LA DIVISION SEXUAL EN ÇATALHÖYÜK • GALAXIAS EN COLISION

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ATOMOS DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO

BASES MOLECULARES DE LA ESQUIZOFRENIA

ETNOCLIMATOLOGIA DE LOS ANDES

LA PRIMERA CALCULADORA DE MANO

PERDIDA DE SINCRONIA EN LOS ECOSISTEMAS



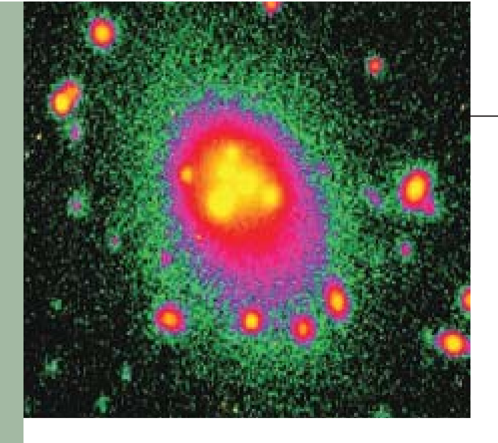
INVESTIGACION y CIENCIA

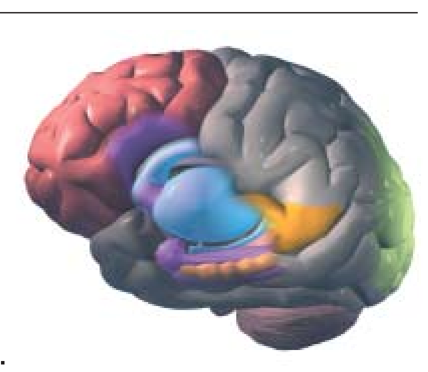
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

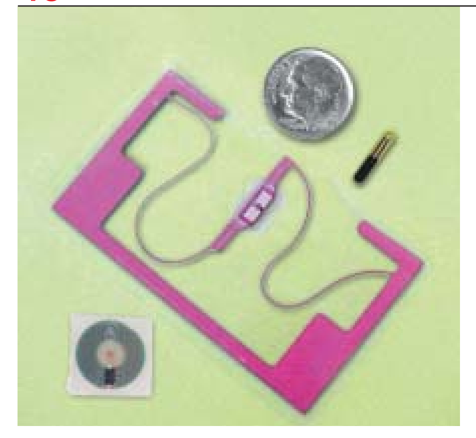
Marzo de 2004

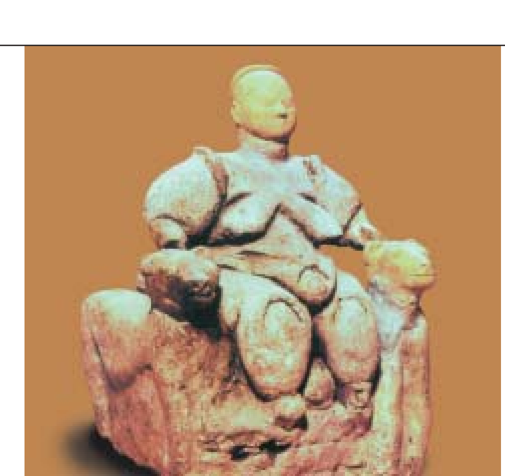
Número 330

















DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

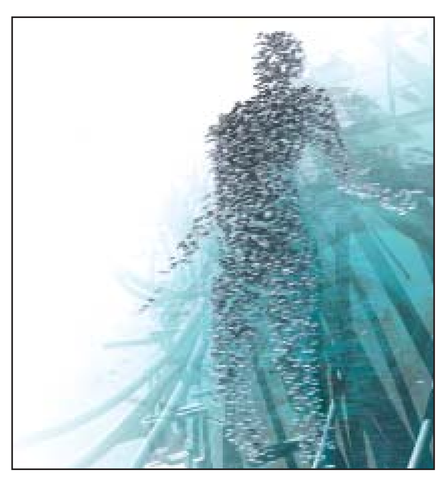
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *La curiosa historia de la primera calculadora de mano* y *Aventuras problemáticas*; Esteban Santiago: *Bases moleculares de la esquizofrenia*; José Manuel García de la Mora: *La división sexual en Çatalhöyük*; Ramón Pascual: *Atomos del espacio y del tiempo*; Joandomènec Ros: *Pérdida de sincronía en los ecosistemas*; Manuel Puigcerver: *Etnoclimatología de los Andes*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* y *Curiosidades de la física*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

ESTALLIDO Y CONTRACCION: «Que una teoría plantee que nuestro universo se inició a partir de una concentración extrema de masa y radiación suscita la pregunta de cómo habría llegado el mundo a ese estado. Las fórmulas relativistas nos dicen que las distintas porciones del universo se separan con una energía que sobrepasa las fuerzas de atracción newtoniana entre ellas. Extrapolando esas fórmulas hasta el período anterior a que se alcanzase el estado de máxima concentración, hallamos que el universo debió derrumbarse sobre sí mismo, con la celeridad, ni mayor ni menor, con que ahora se expande. Concluimos así en que nuestro universo ha existido durante toda una eternidad; que hasta hace unos cinco mil millones de años fue contrayéndose de manera uniforme desde un estado de infinita rarefacción; y que el universo está ahora en pleno rebote, dispersándose irreversiblemente hacia un estado de infinita rarefacción.»

—*George Gamow*

...cien años

EL ATOLÓN DE DARWIN. «Darwin deseó ardientemente un examen más completo de los arrecifes coralinos, *in situ.* Llegó al punto de expresar su convicción (en una carta de 1881 a Agassiz) de que nada realmente satisfactorio podría aportarse que sirviera de elemento de juicio sobre su origen hasta que no se efectuaran perforaciones en uno de los atolones del Pacífico o del Indico y se extrajese una muestra desde una profundidad de al menos 150 metros. Tan anhelada culminación se ha visto, no obstante, más que lograda, ya que la perforación de Funafuti llegó hasta un límite de 340 metros, durante la tercera expedición a esa mancha anular de tierra sita en el Pacífico Sur. Las pruebas conseguidas muestran que el material parece ser exclusivamente de naturaleza orgánica, originada por los esqueletos calcáreos de animales marinos invertebrados y por algas también calcáreas.»

LOS ABRUZOS EN EL ARTICO. «Gran interés rodea a las expediciones polares de su Alteza Real Luis Amadeo de Saboya, duque de Los Abruzos. El 'Estrella Polar' iba a navegar lo más hasta el norte que pudiera siguiendo alguna línea costera; desde ahí, un equipo viajaría hacia el polo en trineos. No llegaron al polo, pero sí a una latitud hasta ahora no alcanzada por el hombre. Se demostró que con determinación, aguante y un grupo de perros bien seleccionados se puede atravesar el helado océano Artico hasta la latitud más septentrional. Sin embargo, en el archipiélago de Francisco José, el campo de hielo atrapó el barco y amenazó con hundirlo. Por ello, la tripulación se vio obligada a desembarcar con la mayor prontitud los pertrechos de invierno (*véase ilustración*) y poner a buen recaudo los materiales necesarios para construir un habitáculo. En la primavera siguiente se efectuó la retirada.»



El Estrella Polar atrapado en el hielo del océano Artico, 1904.

...ciento cincuenta años

CONFERENCIA DE FARADAY. «Michael Faraday pronunció la conferencia inaugural de la Regia Institución de Londres ante una nutrida audiencia. Versó sobre la evolución de los principios eléctricos desde el funcionamiento del telégrafo eléctrico. Para ilustrar la exposición, se dispuso un vasto montaje de baterías voltaicas, consistente en 450 pares de placas y trece mil metros de hilo conductor revestido de gutapercha, casi seis mil quinientos de los cuales estaban sumergidos en tinas con agua. El principal aspecto que el profesor deseaba ilustrar era la confirmación —propiciada por las experimentaciones a gran escala con el telégrafo eléctrico— de la identidad de la electricidad dinámica, o voltaica, y la electricidad estática, o por fricción.»

CENA SAURIA. «El profesor Richard Owen fue obsequiado recientemente con una cena en el jardín del Palacio de Cristal de Sydenham. El festín se ofreció dentro de un molde de iguanodonte. Este animal fue uno de los primeros habitantes de Sussex; cerca de Horsham se han hallado algunos huesos suyos. Las dimensiones del molde respetaban estrictamente lo que sabemos de su anatomía. La distancia del hocico a la punta de la cola era de más de diez metros. En el interior de la criatura cenaron cómodamente veintiún caballeros, con el profesor Owen, sentado en la cabeza, haciendo las veces del cerebro.»

APUNTES

HORTICULTURA

Aromas

Petunias y bocas de dragón, una vez polinizadas, reducen su exudación aromática. Les resulta costosa. Esa energía la dirigen hacia otras actividades metabólicas, más necesarias en adelante. Natalia Dudareva, Florence Negre y su grupo de la Universidad de Purdue han descubierto los pormenores moleculares de la pérdida de fragancia de algunas flores. Uno de los ingredientes más importantes del aroma es el metilbenzoato. Estas investigadoras hallaron que las petunias polinizadas sintetizan etileno, que frena la producción de la enzima responsable del metilbenzoato en esas flores. Las bocas de dragón se basan en un sistema de realimentación más complejo, en el que el etileno y la proporción entre otros dos compuestos determinan los niveles de metilbenzoato. El conocimiento de esos mecanismos naturales de disminución del aroma podría ser un primer paso hacia la recuperación de la fragancia de las plantas comerciales, que se cultivan para que duren más, a expensas de su buen olor. *—Steve Mirsky*

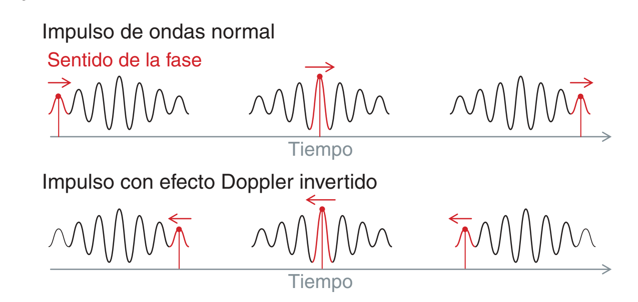


Las petunias pierden su fragancia tras la polinización.

FISICA

Efecto Doppler invertido

El efecto Doppler agudiza el silbido de un tren cuando se aproxima (las ondas sonoras se “apelotonan”) y lo vuelve más grave cuando se aleja (las ondas se “estiran”). En el Centro de Tecnología de Sistemas Avanzados BAE, de Bristol, han conseguido invertir el efecto. Hicieron que un impulso de ondas rebotara en una barrera electrónica en retroceso; diseñaron el circuito de modo que las crestas y valles del impulso rebotado —la fase del impulso— viajasen en sentido contrario al impulso de ondas en su conjunto, como si remontasen un río. La frecuencia del impulso rebotado aumentaba conforme la barrera retrocedía, al revés que en el efecto Doppler. (Téngase en cuenta que la frecuencia de un impulso de ondas depende de la velocidad de fase, no del movimiento del impulso considerado como una unidad, o velocidad de grupo.) Este fenómeno podría facilitar un nuevo control sobre las ondas electromagnéticas, con aplicaciones en medicina y telecomunicaciones. *—Charles Choi*



BIOLOGIA

Tejer y destejer recuerdos

En la raíz de numerosos trastornos, así la enfermedad de las vacas locas y el insomnio letal, se encuentran los priones. Pero la capacidad de los priones de adoptar una segunda forma —y de forzar otras proteínas a adaptarse a esa configuración— no siempre causa disfunciones celulares; lo muestra CEPB, una proteína. Ciertos experimentos revelan que CEPB, cuya función normal consiste en la creación de otras proteínas en la sinapsis durante la formación de recuerdos, posee una conformación alternativa. En esta segunda configuración continúa siendo funcional; puede, además, reconformar otras proteínas. La naturaleza priónica de la CEPB podría contribuir a salvaguardar la memoria a largo plazo: el estado priónico se caracteriza por su larga duración.



Recuerdos sepultados: el cerebro posee un mecanismo biológico para reprimir recuerdos.

Hablaba Freud de la supresión de determinados recuerdos. Un experimento ha encontrado un mecanismo biológico ligado a esta hipótesis freudiana de la “represión”. Los voluntarios memorizaban primero parejas de nombres sin relación alguna: “ordalía-cucaracha”. Luego, al mirar a la primera palabra del par, se les pedía que no recordaran la acompañante. Cuando la represión conseguía deteriorar el recuerdo de la segunda palabra, la corteza prefrontal se mostraba más activa, según un patrón similar al que se da cuando esa misma región cerebral suspende una actividad física. A la vez, el hipocampo, conformador de la memoria, estaba menos activo, lo que sugería que la corteza prefrontal controlaba su comportamiento. *—Charles Choi*

SHAI GINOTT (*arriba*); NADIA STRASSER (*centro*); MARC TAUSS *Photonica* (*abajo*)

GEOCRONOLOGIA

Unos primeros tiempos aún más remotos

La desintegración del carbono radiactivo es la base del principal método de datación de muestras antiguas. Pero el reloj de radiocarbono no marca un ritmo constante. Sus divergencias con el reloj de calendario se deben a que la razón atmosférica entre el carbono 14 y el 12 es variable. Para una correcta calibración, se toman como referencia los anillos de los árboles y otros patrones de tiempo absolutos. Un grupo dirigido por Konrad Hughen, del Instituto Woods Hole de Oceanografía, ha extendido la calibración desde hace 26.000 años hasta hace 50.000 (el carbono radiactivo casi desaparece más allá de ese tiempo). Midieron el carbono 14 de foraminíferos planctónicos sepultados en las capas de sedimento marino, anualmente depositadas, de la fosa de Cariaco, frente a la costa de Venezuela. Correlacionaron los resultados con las capas de hielo anuales de un testigo de hielo de Groenlandia. Un grupo francés ha aplicado este mismo método estratigráfico a un testigo submarino de la plataforma ibérica. Ambos grupos de datos concuerdan, dentro de los márgenes de error, lo que refuerza la confianza en el método. La nueva calibración retrotrae aún más en el tiempo las pinturas rupestres de la cueva de Chauvet —comparables a las grandes obras magdalenienses, aun cuando los años que, al parecer, la separan de ellas son más que los transcurridos entre nosotros y Altamira o Lascaux—: tendrían unos 36.000 años, no 31.000. Algunos arqueólogos han expresado dudas acerca de la datación de Chauvet; no pueden admitir un desarrollo estilístico semejante en fechas tan tempranas. Sin embargo, se siguen encontrando obras de arte prehistórico muy avanzadas, como las figuras auriñacienses —una cabeza de caballo, un pájaro, una quimera de humano y felino— de Hohle Fels, en Suabia, a las que se atribuyen más de 30.000 años de antigüedad.



El fitoplancton que se deposita, a su muerte, en el fondo del océano sirve para calibrar la datación por radiocarbono.

MECANICA

Marcar el paso

La mayoría de los ensayos concebidos para estudiar la carrera se ha centrado en observaciones externas de su mecánica. Biólogos de la Universidad del Noroeste han fijado su atención en los músculos. Han medido el riego sanguíneo en las patas de la pintada común, *Numida meleagris*. Se pensaba hasta ahora que casi toda la energía consumida durante una carrera por los músculos se destinaba a generar fuerza cuando el pie está en el suelo (fase de postura). Descubren ahora que adelantar la extremidad (fase de batida) se lleva alrededor de una cuarta parte de la energía que gastan nuestros miembros inferiores. Puesto que las aves corredoras son los segundos mejores velocistas bípedos tras los seres humanos, afirman estos investigadores que su trabajo podría aportar valiosas claves para el conocimiento de la locomoción humana, con beneficios potenciales para las terapias rehabilitadoras.

—Charles Choi

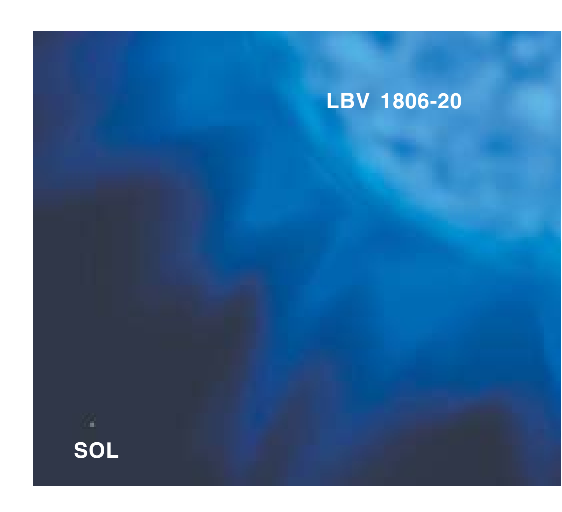
La fase de batida en la carrera consume más energía de lo que se creía hasta ahora.

ASTRONOMIA

Superestrella

El telescopio de Monte Palomar ha divisado la que pudiera ser la estrella más luminosa hasta ahora conocida, una gigante de tan descomunal tamaño, que desafía las teorías vigentes. El brillo de LBV 1806-20, situada a unos 45.000 años-luz de la Tierra, multiplica por 40 el del Sol. La estrella más luminosa de nuestros catálogos, Pistola, sólo lo multiplica por seis. LBV 1806-20 tiene una masa unas 150 veces la solar, pese a que las teorías actuales nieguen la posibilidad de existencia a estrellas con una masa superior a 120 veces la de nuestro astro: sus fuegos nucleares quemarían lo que sobrepasara ese límite. El coloso está rodeado de toda una colección de estrellas anormales, entre ellas una rara estrella de neutrones magnética. LBV 1806-20 y sus anómalos vecinos quizá no naciesen de una contracción gravitatoria impulsada por su propio peso, sino al aplastar la onda de choque de una supernova a una nube molecular que tuviese cerca.

—Charles Choi



Comparado con la estrella LBV 1806-20, el Sol parecería un planeta insignificante.

ALFRED PASIEKA *Science Photo Library* (*arriba*); JON FEINGERSH *Corbis* (*centro*); MEGHAN KENNEDY *Universidad de Florida* (*abajo*)

La curiosa historia de la primera calculadora de mano

Se llamaba “Curta” y fue providencial para su inventor cuando se vio en un campo de concentración nazi

Cliff Stoll

Johannes Kepler, Isaac Newton, Lord Kelvin... todos lamentaron el tiempo que hubieron de consumir realizando operaciones aritméticas elementales. Las soluciones quedaban oscurecidas por rimeros de folios cubiertos de números; las ecuaciones, por elegantes que fuesen, desembocaban en pesados cálculos. ¡Qué no habrían dado por una calculadora de mano capaz de sumar, restar, multiplicar y dividir! Una calculadora que ofreciera los resultados expresados ya en dígitos, que tuviera memoria y una interfaz sencilla que se manejase bien con los dedos.

Pero hasta 1947 no se dispuso de una máquina así. Durante el cuarto de siglo siguiente, las mejores calculadoras de mano llegaron de Liechtenstein. En este país minúsculo, de paisajes alpinos y paraísos fiscales, Curt Herzstark construyó la máquina calculadora más ingeniosa que jamás habría de adornar la mano de un ingeniero: la calculadora Curta.

Los anuncios de las páginas finales de *Scientific American* prometían en los años sesenta una panacea aritmética: “La Curta es una calculadora de precisión que resuelve todas las operaciones aritméticas. Suma, resta, multiplica, divide, halla raíces cuadradas y cúbicas... ejecuta cualquier cálculo que pueda surgir en la ciencia o en el comercio... Disponible a prueba... Precio: 125 dólares”.

El instrumento —todavía lo poseen algunos afortunados— recuerda mucho a un molinillo de pimienta. Realiza todas las operaciones de una calculadora electrónica típica, pero es enteramente mecánica: no tiene pilas, ni pantalla de cristal líquido, ni teclado. Para sumar hay que girar una manivela.

¿Una sumadora “de cuerda”? Así es. Estoy asiendo la Curta con la mano izquierda y calculando con la derecha. Para sumar dos números, los introduzco mediante unos pequeños botones deslizantes y hago girar la manivela. El resultado aparece en unas ventanillas dispuestas en círculo en la tapa superior. Esto sí que es darle vueltas a un problema.

La máquina multiplica y divide, aunque para hallar el producto de dos números grandes deben darse 10 o 20 vueltas a la manivela. No tiene interruptor de puesta en marcha; un aro, muy fácil de accionar con el índice, pone a cero la memoria. Por lo que se refiere a raíces cuadradas o cúbicas, la verdad es que hay que llevar consigo unas tablas especiales y recordar unos cuantos algoritmos para abreviar los cálculos.

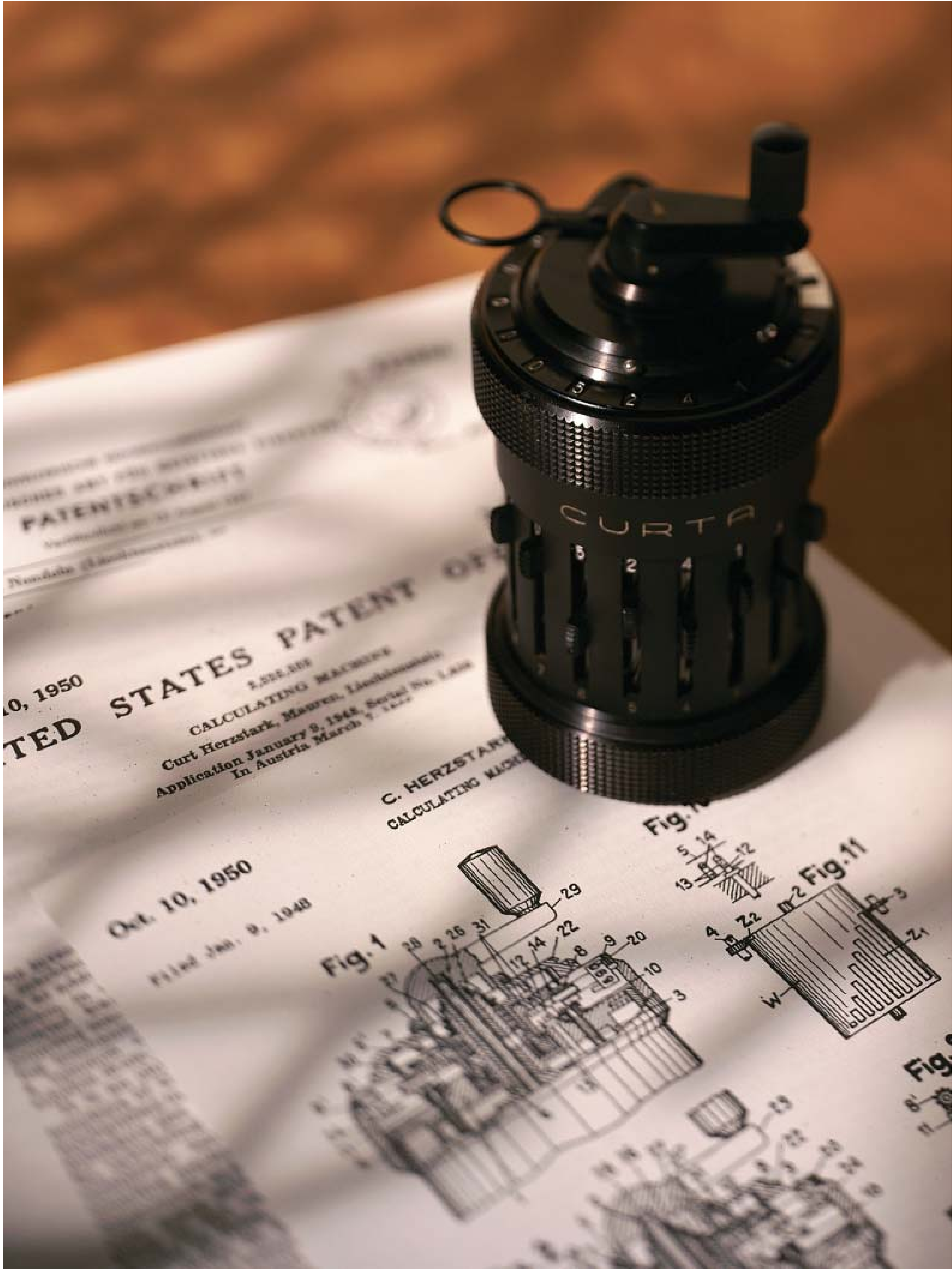
No se trata de una regla de cálculo, capaz sólo de resultados aproximados con tres o cuatro cifras decimales. Son 11 las cifras que, con un leve chasquido, asoman por las ventanas de la parte superior. Tal vez su calculadora electrónica no ofrezca resultados con una precisión de 11 cifras.

La Curta lleva a cabo cálculos aritméticos, sí, pero ¿hay que llamarla por eso “tesoro de nuestra civilización” y “maravilla de la técnica”? ¿Por qué los coleccionistas codician estos artefactos, si cualquier calculadora barata opera mucho más velozmente?

Tanta admiración nace de la sensación de elegancia y seguridad que acompaña a sus impresionantes capacidades aritméticas. Los cursores que introducen los números corren con delicadeza hasta el lugar que les

1. ¿SERA UN MOLINILLO DE PIMIENTA? ¿Un objetivo fotográfico? ¿Un afilador de lápices, tal vez? No, es una calculadora mecánica de mayor precisión que muchas de las electrónicas. Mide sólo 10 cm de altura y 5 cm de diámetro.

TINA WEST



CURTA
TED STATES PATENT
10, 1950
CALCULATING MACHINE
Curt Herzstark, Mauren,
Application January 9, 1948
In Austria March
C. HERZSTARK
Oct. 10, 1950
Filed Jan. 9, 1948
Fig. 1
Fig. 11

corresponde. La manivela gira con la misma suavidad que las agujas de un buen reloj de bolsillo. Las cifras encajan en su lugar sin esfuerzo ni demora. Cada número está grabado en magnesio; piñones de acero se encargan de los cálculos. La Curta ronronea mientras calcula.

Estaba pensada para que fuese sencillo calcular. Lleva, para evitar los errores, ventanas para los operandos, para indicar el número de vueltas que se le han dado a la manecilla y para el resultado. Una especie de pequeños pestillos permite percibir al tacto cuándo se ha cargado un dígito y cuándo está listo el resultado. Los errores son fáciles de enmendar; un seguro impide que se puedan forzar los engranajes haciendo girar la manecilla en sentido contrario al debido. Tampoco es posible borrar el resultado por error, porque no es posible accionar involuntariamente el anillo de puesta a cero.

La calculadora Curta combina la precisión de un reloj suizo, la artesanía de una clásica cámara Nikon F y la elegancia de un vals, todo ello comprimido en un compacto cilindro. En 1959, dejó boquiabiertos a los ingenieros. ¡Una calculadora que cabía en el bolsillo! Y lo más asombroso de todo era que tal aparato había surgido del nadir de la civilización: el campo de concentración de Buchenwald.

Difícil miniaturización

Al igual que los profesionales de hogaño buscan los ordenadores más livianos, los ingenieros y los contables de antaño suspiraban por una máquina matemática portátil. Thomas de Colmar construyó una máquina sumadora para la Exposición de París de 1855, pero tenía el tamaño de un piano. Cincuenta años después, el Millionaire Calculator no sólo sumaba y restaba, sino que también multiplicaba y dividía. Lo malo era que pesaba unos 30 kilos. Para disponer de una auténtica calculadora de bolsillo, hubo que esperar hasta Curt Herzstark.

Herzstark nació en 1902. Creció rodeado de calculadoras. Su padre vendía en Viena máquinas de oficina de las marcas Burroughs y Remington. Al cabo de unos años, la familia abrió una fábrica de calculadoras. La empresa tuvo éxito, y el joven Curt se encontró exhibiendo por toda Austria el funcionamiento de sus máquinas de sumar.

Durante la Primera Guerra Mundial produjeron material bélico. Llegada la paz, deteriorada o destruida la maquinaria, su padre se dedicó a la venta de calculadoras usadas hasta que se pudiera reconstruir la factoría. Surgieron, por otra parte, nuevos competidores, entre ellos Fritz Walther, constructor de pistolas automáticas, apurado en ese momento a causa del desarme posbélico. Walther, viendo oportunidades en los equipos de oficina, dedicó su fábrica de armas a producir sumadoras eléctricas.

Los fabricantes de calculadoras proliferaron en los años treinta. “Pero había en el mercado mundial una demanda no cubierta”, rememoraría Herzstark años después. “Allí donde iba me topaba con competidores que ofrecían máquinas maravillosas, caras y grandes. Pero cuando hablaba con un maestro de obras, un arquitecto o un funcionario de aduanas, me decían: ‘Necesito una máquina que me quepa en el bolsillo y sirva para calcular. No puedo viajar 10 kilómetros hasta la oficina sólo para sumar unas cuantas columnas de números’.”

Algunos fabricantes, como Monroe, Friden y Marchant, trataron de reducir el tamaño de sus modelos grandes de sobremesa, a la manera de un relojero que quisiera miniaturizar un reloj de pared para fabricar un reloj de pulsera, pero no tuvieron gran éxito. Al visitar anticuarios puede que nos topemos con alguna de las calculadoras “en miniatura” de antaño. La sumadora “ligera” de Marchant pesaba unos 15 kilos, disponía de 9 columnas de botones y el carro ofrecía 18 lecturas mecánicas. Sobresalían por su costado dos grandes manivelas. Los contables la llevaban a cuestas en una maleta especial. Tal era el significado de “portátil” allá por 1935.

Tras haber visto cómo fracasaban las tentativas de miniaturizar las máquinas sumadoras de sobremesa, Herzstark, que andaba a la sazón por la treintena, partió de cero. “Consideré el problema empezando por el final. Supongamos que haya sido inventado ya todo lo necesario. ¿Qué aspecto habría de tener la máquina para que alguien pudiera usarla?”

“No podía ser de forma cúbica, ni tampoco una regla: tenía que ser un cilindro, para poder sostenerla en una mano. Y sostenida en una mano, las acciones necesarias habrían de hacerse con la otra, actuando sobre la superficie lateral, la tapa superior y el fondo. El resultado podría aparecer en la parte superior.”

Herzstark, como los buenos informáticos de hoy, empezó por la interfaz de usuario, y no consintió que fuese el mecanismo el que controlase el diseño. En lugar de utilizar un teclado similar al de una máquina de escribir, optó por rodear un cilindro con cursores, de modo que la introducción de datos se hiciera deslizándolos con el pulgar u otro dedo. Se dejaban así libres un área en el contorno de la cara superior del cilindro, apta para mostrar los resultados, y una ubicación adecuada para una manivela con la que accionar la calculadora.

Resumen/La Curta

- La primera calculadora de gran precisión que se pudo sostener en una mano no fue electrónica, sino mecánica. Sumaba, restaba, multiplicaba, dividía y sacaba raíces cuadradas. A diferencia de las reglas de cálculo, analógicas, ofrecía el resultado mediante dígitos, con una precisión de al menos 11.
- Su inventor, Curt Herzstark, la diseñó mientras estaba preso en el campo de concentración de Buchenwald, durante la Segunda Guerra Mundial. Adoptó técnicas matemáticas y mecánicas nuevas con el fin de ahorrar volumen y peso.
- Muy utilizada por ingenieros, topógrafos y contables entre 1950 a 1970, cayó en desuso con la llegada de las calculadoras electrónicas de bolsillo en los años setenta.

Otras calculadoras mecánicas se valían de un mecanismo individual para calcular cada dígito del resultado. La calculadora Friden, por ejemplo, contaba con 10 columnas de teclas para introducir los números y 10 juegos de engranajes de cómputo, pesados y caros. Herzstark se percató de que bastaría con un solo mecanismo calculador si se aplicase a cada dígito de los datos consecutivamente. Su calculadora tendría ocho cursores para introducir los dígitos, pero bastarían los dientes de un solo tambor central para efectuar las operaciones aritméticas. El tambor le permitiría reducir el tamaño y el peso de su máquina.

Para 1937, Herzstark había ideado la manera de efectuar operaciones aritméticas mediante un solo tambor rotativo de dientes. La adición y la multiplicación estaban perfectamente resueltas. Pero el diseño trompicaba en la sustracción y la división. No le era posible restar haciendo girar la manecilla hacia atrás, porque la adición de dos dígitos puede originar un dígito que deba arrastrase, mientras que la resta requiere a menudo "robar" del dígito siguiente. Con un solo tambor aritmético de dientes no era posible "mirar hacia adelante" y ver lo que iba a pasar.

"Viajaba en tren por la Selva Negra, solo en el departamento. Estaba mirando por la ventanilla cuando se me ocurrió: '¡Pero si se puede obtener el resultado de una sustracción sumando al minuendo el complemento del sustraendo!'"

Para hallar el complemento a 9 de un número basta restar de 9 cada una de sus cifras. Se puede simular la resta de dos números sumando al minuendo el complemento a 9 del sustraendo. Por ejemplo, para calcular 788139 menos 4890, se empieza calculando el complemento a 9 de 004890, que es 995109. Después se suman 788139 y 995109, con lo que se obtiene 1783248. Se suprime el dígito de máximo orden, y se llega a 783248. Por último, se suma 1 y se obtiene la solución: 783249. Precioso. El mismo procedimiento, exactamente, se utiliza en los ordenadores de nuestros días.

La calculadora de Herzstark iba a seguir teniendo un único tambor rotatorio, pero contaría con dos conjuntos de dientes, dedicados, uno a la adición, el otro a la sustracción. Bastaba alzar la manivela tres milímetros para engranar los dientes de la sustracción y efectuar la suma de complementos a 9. De este modo, la resta resultaba tan sencilla como la suma.

La multiplicación y la división podrían resolverse por repetición de la adición o la sustracción. Y dado que se podía rotar el registro de resultados con respecto a los cursores de introducción de datos, resultaban posibles ciertos atajos para acelerar dichas operaciones. Por ejemplo, para multiplicar por 31415 no es necesario dar treinta y tantas mil vueltas de manivela; el sistema móvil las reduce a 14 vueltas: cinco vueltas para el cinco, una sola para el 10, cuatro veces para el 400, y así sucesivamente.

A finales de 1937, Herzstark estaba preparado para construir una calculadora de mano que efectuase las cuatro operaciones. En ésas llegó Hitler.





2. CURT HERZSTARK, inventor de la Curta, se familiarizó con las calculadoras mecánicas desde niño, en la fábrica de su progenitor. A los ocho años (*derecha*) demostró ya su destreza en problemas de multiplicación con cinco o seis cifras en la Muestra Internacional de Equipos de Oficina de Viena, en 1910, lo que le dio fama de "niño prodigio". Abajo aparece en un gesto similar setenta y cinco años después.

CORTESIA DE RICK FURR

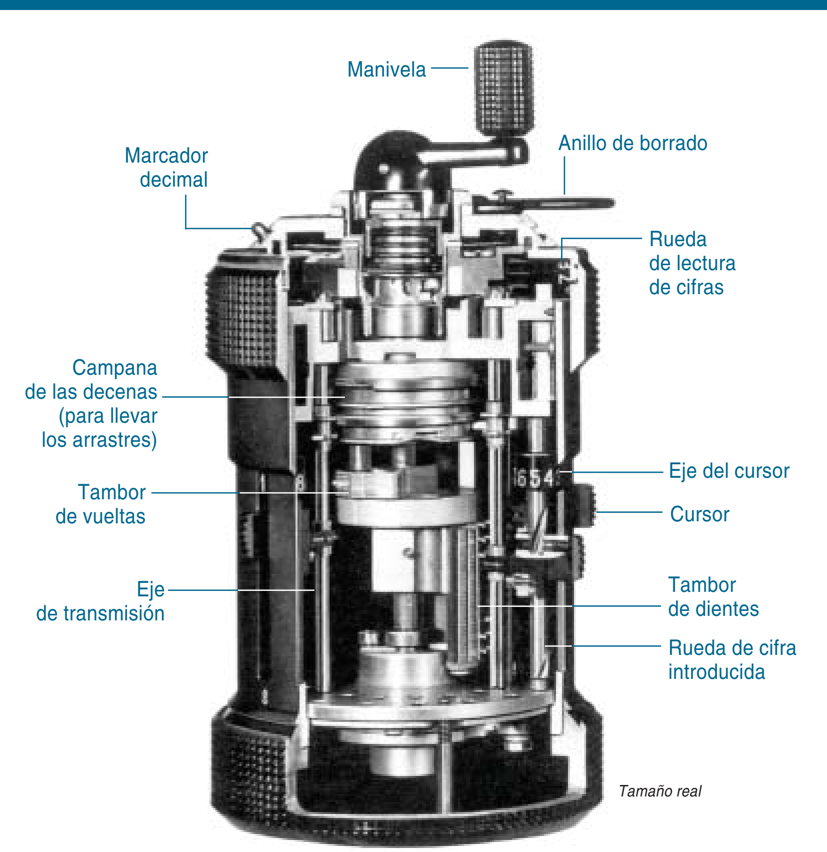
En Buchenwald

El ejército alemán invadió Austria en marzo de 1938. Herzstark, de madre católica y padre judío, iba a tener que afrontar graves dificultades. "Las primeras semanas fueron espantosas. Primero, la chusma; después, el antisemitismo y el horror sin tasa."

Se presentaron en la fábrica inspectores militares alemanes. Para sorpresa de Herzstark, le pidieron que realizase piezas de precisión para el ejército. Tras una negociación unilateral, empezó a fabricar calibradores para los Panzer.

Las cosas fueron bien durante unos años. "Pero en 1943 arrestaron a dos empleados de la fábrica", cuenta Herzstark. "Habían estado escuchando estaciones de radio inglesas y

UNA MIRADA A SU INTERIOR





COMO DICE UN ANTIGUO MANUAL, "la pequeña Curta es un instrumento de precisión". El tambor de dientes que efectúa la adición y la sustracción (*arriba y a la derecha*) cuenta con 37 láminas de medio milímetro de espesor cada una. Una pieza aparte, llamada "campana de las decenas", se encarga de llevar los arrastres. Cada dígito del visor de la tapa tiene una altura de 3 milímetros y es fácilmente legible a la distancia del brazo. La primeras Curtas disponían de ocho cursores para introducir los números y ofrecían 11 dígitos en el registro de resultados. Versiones posteriores permitían operandos de 11 cifras y ofrecían 15 en el resultado.

RICK FURR

transcribieron las emisiones con una máquina de escribir. La máquina fue identificada; su propietario resultó ser uno de nuestros mecánicos. Le decapitaron. El otro fue condenado a prisión perpetua, lo que era mucho peor. Traté de intervenir en favor de ellos ante la Gestapo. El funcionario me expulsó sin miramientos, diciendo: '¡Qué descaro, que un medio judío se atreva a hablar en favor de personas como ésas!'

"Fui invitado a testificar a favor de los detenidos, y me detuvieron a mí. Registraron mi casa. Desde luego, jamás fui juzgado. Me acusaron de ayudar a judíos, de incitación y de tener una relación amorosa con una mujer aria. Puras falsedades. Más adelante descubrí que una docena de personas habían sido arrestadas en circunstancias parecidas."

Las SS le encerraron en la infame prisión de Pankratz, donde se torturaba a los judíos. "Compartía una celda con otros 50 presos, una celda sin nada en absoluto, sin camas, sin lavabo, nada. Hasta se puede decir que tuve la suerte de que me enviaran al campo de concentración de Buchenwald."

"Una vez allí me asignaron a una unidad de trabajo en la que creí que acabaría bajo tierra. Era el mes de noviembre, y todo cuanto tenía era una camisa, unos pantalones de prisionero, unos zuecos de madera y una gorra de lana. Trabajaba en un huerto y estaba completamente agotado.

"Espiritualmente anulado, pensé que debía morir. Me mandaron que me presentara al oficial de las SS que estaba al mando del campo. Tenía en la mano la historia de mi vida; me dijo: 'Ha producido usted calibradores y otros instrumentos para el ejército. Escuche con atención. Si obedece estrictamente nuestras órdenes podrá encontrar la vida soportable. Le ordeno que trabaje en la fábrica aneja al campo de concentración. Si lo hace bien, tal vez pueda vivir'."

Los nazis habían construido junto a Buchenwald una fábrica de mano de obra esclava destinada a maquinaria para proyectos militares secretos. El ingeniero que la dirigía le encargó a Herzstark piezas de precisión que habían de ser enviadas a Peenemünde, el enclave desde donde se lanzaban los misiles balísticos. Durante los dos años siguientes, Herzstark construyó piezas de precisión para los cohetes V2.

Siendo el responsable de la sección que construía piezas mecánicas, Herzstark tenía que visitar diferentes lugares de la fábrica. Al principio, otros prisioneros pensaron que era un informador. "No tardaron en descubrir que yo no era un espía. Por ejemplo, le decía al operador de una máquina: 'Está usted haciendo bien esta pieza, amigo mío. Es usted industrioso, pero le han ordenado realizar un proceso sencillo en una máquina cara. Informaré de que la máquina no está siendo utilizada eficientemente, pero que el prisionero es modélico en su trabajo'. De este modo llegué a conocer gente de Luxemburgo, de Francia, de Dinamarca y de otros muchos lugares.

LA CURTA EN ACCION

UN PAR DE PROBLEMAS ARITMETICOS servirán para comprender cómo funcionaba la Curta.

ADICION

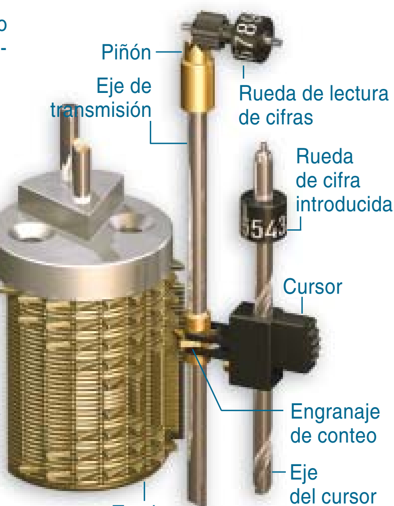
Sumar 32 + 41 + 49

1. Se hace girar el anillo de borrado, para poner a cero el registro de resultados y el contador de vueltas.

2. Se introduce el 32 deslizando hacia abajo los dos cursores situados más a la derecha, hasta que aparezcan los dígitos 3 y 2 en las ventanas situadas bajo el rótulo CURTA (*a la derecha*).

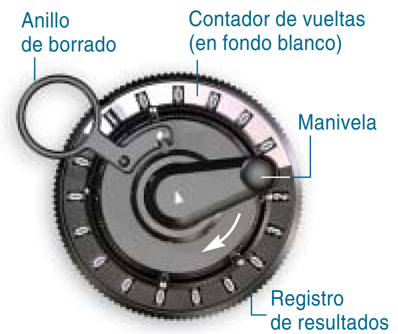


Al deslizar un cursor, el eje correspondiente, que lleva inscrito un surco espiral, hace girar una rueda solidaria con él (la rueda de los números introducidos) para dejar ver el número seleccionado. El desplazamiento del cursor hace bajar también un piñón de recuento, coaxial y solidario con un segundo eje, el eje de transmisión. En este ejemplo, el piñón de las decenas está situado de forma que pueda engranar con una lámina del tambor de dientes que posee tres dientes, y el piñón de las unidades se sitúa junto a una lámina del disco provista de dos dientes.



3. Se hace girar la manecilla una vuelta completa

Esta maniobra permite que el tambor de dientes gire 360 grados, y que sus dientes hagan girar los engranajes de conteo, y solidariamente, sus ejes de transmisión. Otros piñones situados en lo alto de estos ejes provocan que giren las ruedas de lectura de cifras, que dejan ver un 3 y un 2 en el registro de resultados (*a la derecha*).

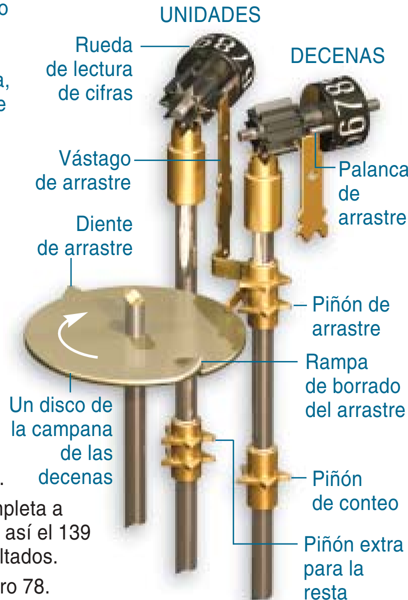


4. Se introduce el 41 utilizando por segunda vez los cursores de unidades y decenas.

5. Se hace girar la manecilla para sumar 41 al registro de resultados, que ahora muestra 73.

6. Se introduce el 49, se hace girar la manecilla y el resultado final (122) aparece en lo alto.

Esta última operación exige que la Curta arrastre un 1 hasta el lugar de las decenas. Cuando la rueda de lectura, en el extremo superior de un eje de transmisión, pasa de 9, un diente de arrastre que sobresale de la rueda hace bajar un piñón de arrastre coaxial con el eje de transmisión de las cifras de orden inmediatamente superior (en este caso, las decenas), situando el piñón de modo que interaccione con la campana de las decenas. Al girar la campana, un diente de un disco de la campana mueve el engranaje, provocando que la rueda de cifras del segundo eje (el correspondiente a las decenas) pase al dígito siguiente.



SUSTRACCION

Calcular 139 – 78

1. Se pone la máquina a cero.

2. Se introduce el 139 igual que para sumar.

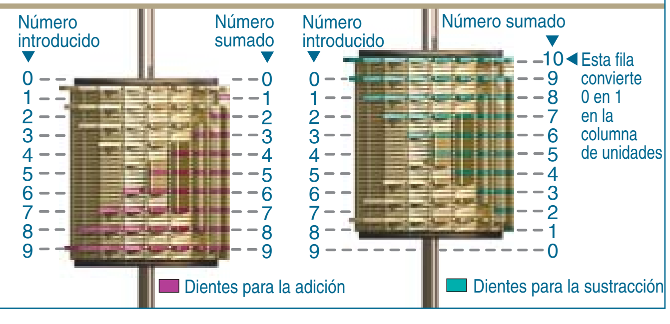
3. Se da una vuelta completa a la manivela, situando así el 139 en el registro de resultados.

4. Se introduce el número 78.

5. Se tira hacia arriba de la manivela; de este modo, los dientes de los ejes de transmisión se alinean con los elementos de "sustracción" del tambor (*lado derecho del diagrama al pie*). Se da una vuelta a la manivela.

6. La diferencia aparece en la ventana de resultados: 61.

La Curta efectúa restas mediante sumas de complementos a 9. Al tirar de la manivela se eleva el tambor: si el valor introducido es 7, el piñón de recuento del eje de transmisión se alinea con una lámina del tambor que tiene 2 dientes, mientras que el valor 8 lo alineará con una lámina de un diente; un 0, con una de 9 dientes. Una vuelta de la manivela suma 21, precedido por una serie de nueves hasta 139. Con lápiz y papel obtendríamos un 1 en el extremo izquierdo de la suma, un resultado erróneo. Pero en la Curta, el eje de transmisión que ocupa la posición izquierda extrema no tiene palanca de arrastre, por lo que ese 1 extra desaparece. La elevación de la manivela atiende también a otro propósito. El eje de transmisión correspondiente a las unidades tiene dos engranajes de recuento. El piñón adicional carece de función en la suma normal, pero cuando se tira de la manivela, engrana con los dientes de la lámina situada sobre el otro engranaje. Al girar el tambor, la lámina superior suma 1 a la columna de las unidades, haciendo aparecer el resultado 61, en lugar de 60.



GRIFF WASON; FUENTES: CLIFF STOLL, RICK FURR Y WWW.VCALC.NET

”Naturalmente, los camaradas venían y me decían: ‘Curt, tú tienes cierta influencia. ¿No podrías traer a la fábrica a tal o cual preso? Si no lo traes, morirá’. Así, monté un puesto de control de calidad en una sala de la fábrica, puse allí a uno de los presos, un abogado, y le di un micrómetro.

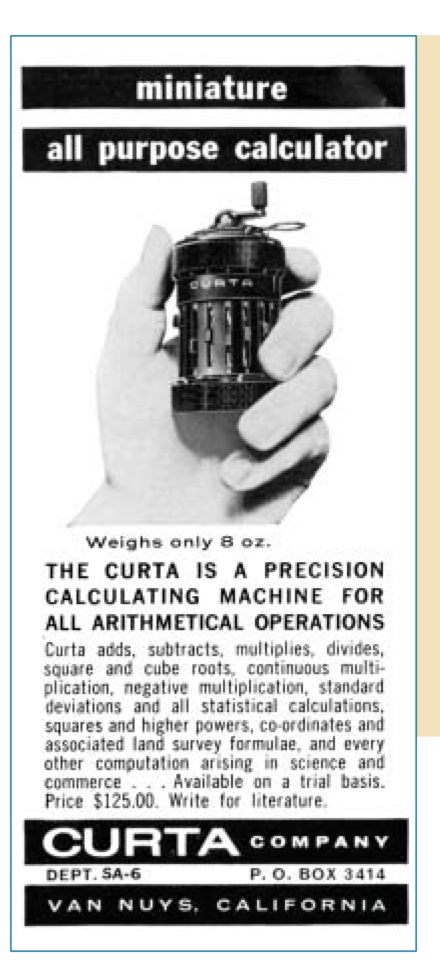
”Los guardianes SS vigilaban nuestras operaciones, y si había una auténtica inspección, se oía un repentino concierto de toses. El abogado sabía entonces que había peligro y se esforzaba en parecer aplicado. Pero yo vivía angustiado, porque los compañeros siempre querían más de mí. Era consciente de que, de saberse, estaría bajo la fría tierra al día siguiente. Pero el destino me ayudó una vez más.

”Conforme los alemanes iban retirándose de Italia, se llevaban consigo la maquinaria. Un día recibimos en Buchenwald dos camiones de máquinas de oficina. Los descargué y los propietarios de fábricas de por allí vinieron a inspeccionarlas. Una de aquellas personas se me quedó mirando, como si me conociera. ‘¿Herzstark?’. ‘Sí, Herzstark’, le respondí. ‘Walther’, dijo él a su vez.”

Fritz Walther, el antiguo competidor de Herzstark, había vuelto a fabricar armas. “Dejó sobre un torno un paquete de cigarrillos. ‘Ahora se acabó todo’, me dije. ¿No estaba acaso estrictamente prohibido aceptar regalos? Mi guardián lo vio, pero no quiso verlo. Se me permitió guardarme los cigarrillos en el bolsillo.”

Durante el período bélico, Walther se había hecho muy famoso. Entendió que el prisionero Herzstark era más importante que cualquier botín italiano, e informó al comandante del campo de concentración del valor de su cautivo.

Poco después, el ingeniero director se llevó aparte a Herzstark y le dijo: “Según entiendo, ha estado usted trabajando en algo nuevo, una pequeña máquina de calcular. Voy a echarle una mano. Vamos a permitir que la dibuje y construya. Si verdaderamente funciona, se la ofreceremos al Führer como regalo una vez ganemos la guerra. Entonces, sin duda, se le concederá a usted la condición de ario”.



3. RETROCEDAMOS 34 AÑOS y 9 meses y veamos la Curta anunciada en el número de junio de 1969 de *Scientific American*. El texto dice: Calculadora universal en miniatura. Pesa sólo 230 gramos. CURTA ES UNA CALCULADORA DE PRECISION QUE RESUELVE TODAS LAS OPERACIONES ARITMETICAS. Curta suma, resta, multiplica, divide, halla raíces cuadradas o cúbicas, efectúa la multiplicación continua y negativa, halla desviaciones típicas y demás estadísticos, eleva al cuadrado y a potencias superiores, maneja coordenadas y fórmulas asociadas de la topografía, y ejecuta cualquier cálculo que pueda surgir en la ciencia o en el comercio... Disponible a prueba. Precio, 125 dólares. Solicite información impresa.

“Me dije para mis adentros: ‘¡Dios mío! Si logro construir esa calculadora, seguiré vivo.’ Inmediatamente empecé a dibujarla tal y como la había imaginado.”

Los SS no aliviaron las tareas que Herzstark había de realizar, pero le permitieron dedicar su tiempo libre a la calculadora. “Trabajé en el invento durante las mañanas de los domingos, y por las noches, después de apagar las luces. Trabajaba en la prisión, en el taller, en el lugar donde comíamos. Dibujé la máquina a lápiz, unos planos completos, con sus dimensiones y tolerancias.”

Entretanto, los Aliados estaban bombardeando Alemania. “A la hora del almuerzo salíamos al exterior de la fábrica. Veíamos siempre los aviones americanos volando en formación de árbol de Navidad, sin un solo avión defensor que se les opusiera. Después llegaban las bombas, veíamos los fogonazos y contábamos 8, 9, 10 segundos. Calculábamos la distancia multiplicando por 333 metros. Pero un día el árbol de Navidad voló hacia nosotros. Comprendimos que ese día nos tocaba a nosotros y nos asustamos terriblemente. Corrí hacia un bosquecillo, hundí la nariz en el musgo y me tapé los oídos. Las bombas llegaron enseguida, detonando, rugiendo... Cuando alcé la cabeza todo estaba lleno de humo y apenas se podía respirar.

”Aquel día resultaron heridos varios cientos de prisioneros, espectáculo terrible. Claro que veíamos cosas igualmente horribles en la vida diaria del campo. Cuando ahorcaban a alguien teníamos que mirarlo hasta que por fin moría. Los ahorcaban de modo que agonizaran lentamente, una muerte lenta y espantosa.

”Algunos guardias no eran malos del todo. Si había algún SS veterano, con frecuencia me decía: ‘¿Qué tal, eh? ¿Qué clase de máquinas vamos a ver hoy?’ Los SS jóvenes eran los más peligrosos. En cuanto tenían oportunidad, eran muy crueles. Si un prisionero les molestaba, lo fusilaban.”

Herzstark tenía sus dibujos casi terminados el 11 de abril de 1945, día en que vio llegar unos jeeps que venían del norte. Un soldado que ocupaba el asiento delantero gritó: “Sois todos libres”. Eran los norteamericanos; algunos, jóvenes

judíos huidos de Alemania antes de que Hitler llegase al poder. Habían sido asignados a la vanguardia porque hablaban alemán.

Buchenwald fue el primer campo de concentración liberado por las fuerzas aliadas. Algunos soldados norteamericanos vomitaron cuando se encontraron con las pilas de diez pisos de cadáveres. Al rememorar aquello, Herzstark sacude la cabeza. "Era incomprensible. De haber sido yo abogado, digamos, de haber tenido yo cualquier otro oficio, habría muerto de forma miserable. Me habrían enviado a una cantera, habría contraído una enfermedad pulmonar a los pocos días, y se acabó. Mil murieron así. Dios y mi profesión me ayudaron."

El príncipe calcula

Algunos días después de que los norteamericanos liberasen Buchenwald, Herzstark fue andando hasta la ciudad de Weimar, con sus planos plegados en el bolsillo. Los llevó a una de las pocas fábricas que seguían en pie, donde los técnicos los examinaron. Recordaba la respuesta: "Fue como si se les cayese una venda de los ojos. La solución estaba clara, y no había que pensar nada más". A pesar de haber sido trazados en el campo de concentración, los dibujos eran tan claros que sólo se tardaron dos meses en construir tres prototipos de la calculadora.

Pero justamente cuando se estaban preparando los contratos, llegó el ejército ruso. Herzstark sabía cuál sería el resultado; se hizo con los prototipos y se dirigió a Viena, con las máquinas desmontadas, guardadas las piezas en una caja. "Si alguien hubiera mirado en su interior, le habría parecido un juguete", dijo. "Lo había desmontado todo."

Viajó hasta Austria como pudo, a pie, durmiendo en el suelo o canjeando cigarrillos por un asiento en el tren. La antigua fábrica de su familia estaba inservible. Dueño tan sólo de sus tres modelos, solicitó patentes y trató de buscar a alguien que invirtiese en su idea. Remington-Rand, una empresa norteamericana de máquinas de oficina, mostró algún interés, pero no llegó a llamarle. Europa, un campo de ruinas, carecía de infraestructura para empezar nuevos proyectos.

Sin embargo, el príncipe de Liechtenstein había estado pensando en desarrollar la industria de su país. Liechtenstein era por entonces eminentemente agrícola; su principal actividad industrial consistía en la fabricación de dientes postizos. Invitado a la corte, Herzstark exhibió sus modelos ante los príncipes, los ministros y los especialistas en patentes. "El propio príncipe, en su palacio, realizó cálculos con ella, observado por miembros de su familia y por profesionales. Enseguida quedó entusiasmado. Afirmó que ese proyecto era el idóneo para su país. Estuvo encantador conmigo; mantuvimos una conversación de cuatro horas."

Todo fue bien al principio. Liechtenstein creó una empresa, Contina. Se acordaron créditos y emitieron acciones. Herzstark, que actuaba de director técnico, recibió una tercera parte de las acciones; le correspondían además regalías por cada máquina vendida.

Herzstark mandó publicar anuncios en los periódicos suizos, solicitando mecánicos que quisieran emprender una nueva carrera. Contina alquiló el salón de baile de un hotel; allí, los técnicos de Herzstark construyeron las primeras 500 calculadoras Curta. Fueron puestas a la venta en 1948 y promocionadas en ferias profesionales y revistas técnicas. Seis meses después, una cadena de grandes almacenes estadounidense quiso encargar 10.000 unidades, con una opción para más. Pero en lugar de aferrarse a este pedido, el director financiero decidió que excedía de la capacidad de la compañía y condenó a la Curta a las ventas por correo, amén de alguna que otra tienda especializada.

La demanda existía, sin embargo, y Contina se expandió desde el salón de baile hasta una fábrica propiamente dicha. La producción se elevó a varios cientos de unidades al mes. En vista de tales progresos, los financieros que había tras la compañía segaron la hierba bajo los pies de Herzstark, la reorganizaron y anularon las acciones del inventor. Al igual que Edison, Tesla y tantos otros inventores, iba a ser despojado de los frutos de su creación.

"Me llegó entonces un golpe de buena suerte que no podía haber imaginado. Las patentes estaban todavía a mi nombre." En los primeros tiempos, los socios evitaron tener que hacerse cargo de las patentes en caso de litigios: prefirieron que fuese Herzstark quien lidiara con las reclamaciones en caso de que se impugnase su invento. Dado que la compañía no había llegado a adquirir los derechos de las patentes, Herzstark pudo lograr que se avinieran a razones. Durante los decenios de 1950 y 1960 sacó provecho real de su invento.

Tras el éxito de la primera calculadora, diseñó un modelo un poco mayor; de 11 dígitos se pasó a 15. Pero en lo sucesivo, la única variación apreciable fue la forma del estuche. Herzstark estableció un insólito récord en la industria de la computación al acertar a la primera con el diseño correcto.

La Curta se fue vendiendo con regularidad durante dos decenios; se la anunciaba como "la calculadora universal en miniatura que cabe en un bolsillo, fiable gracias a su construcción racional y robusta". Como Herzstark pronosticó, los ingenieros astronáuticos utilizaron esas máquinas milagrosas para calcular las órbitas de satélites, los topógrafos para sus mediciones y los contables para cuadrar los libros.

También los equipos de rallies adoptaron las Curta. Los copilotos, sin apartar la vista de la carretera, manejando los números al tacto, podían calcular rápidamente velocidades y tiempos para no ser penalizados en los controles. El pequeño tamaño de la Curta se adecuaba bien al reducido habitáculo de un deportivo y —a diferencia de las primeras calculadoras electrónicas— no sufría con los baches, las vibraciones o las subidas de tensión eléctrica. Incluso en nuestros días, los conductores de rallies de coches antiguos disfrutan calculando con medios mecánicos.

Al igual que los relojes eléctricos de cuarzo desplazaron a los relojes mecánicos de cuerda, las calculadoras electrónicas eclipsaron al invento de Herzstark. Tras 150.000 unidades, la última calculadora Curta se vendió a principios de los años 1970. No se ha fabricado una calculadora mecánica desde entonces.

Herzstark se separó de Contina en mil novecientos cincuenta y tantos.

Asesoró a fabricantes alemanes e italianos. Vivía en un pequeño apartamento en Liechtenstein: en aquella época, los magos de la técnica no podían comprarse fincas millonarias. El gobierno de Liechtenstein no le reconoció sus logros hasta que cumplió los 84 años. Herzstark falleció poco después, en 1988.

En servicio, a pesar de los años

Una calculadora electrónica resuelve problemas más deprisa que la Curta. Y un ordenador hace maravillas comparado con ella. Para poco más debe de servir hoy la Curta que para calcular los gastos del mes durante un apagón eléctrico.

Aun así, mientras sostengo en la mano la diminuta calculadora de Herzstark, legado de mi primer profesor de astronomía, tengo clara conciencia de que esta máquina ha sobrevivido a su primer poseedor y de que sin duda sobrevivirá al segundo de sus dueños. Como dice el manual de instrucciones: "Su Curta le durará toda la vida y, siempre a punto, le será una ayuda indispensable. Puede tener una confianza total en su precisión: la pequeña Curta ha nacido de una prolongada experiencia en el campo de las máquinas de calcular. La han fabricado... especialistas internacionales en mecánica de precisión, con metales de máxima calidad. En su construcción no se utilizan en absoluto materiales artificiales". (No me puedo imaginar leyendo "su programa Excel no utiliza materiales artificiales" o "su procesador Pentium le durará toda la vida", a pesar de que ambas aseveraciones sean ciertas.)

No creo poseer una cosa hasta que no la comprendo, y no puedo comprenderla hasta ver cómo funciona. Así que, provisto de una lente de aumento, pinzas y destornilladores de relojero, destornillo el tambor y dejo a la vista unas 600 piezas: engranajes, ejes, trinquetes y piñones.

Retiro delicadamente ocho ejes de cursores, cada uno mecanizado con una estría en espiral y diseñado sin colaboradores ni ayudantes, y ni siquiera con instrumentos de dibujo. Contemplo el ingenioso mecanismo del tambor de dientes, delineado por vez primera a lápiz, en una situación imposible, bajo las penalidades más extremas. Palpo aleaciones ligeras, revolucionarias en su día. Percibo una perfección táctil que va más allá de medio siglo de progresos en la computación. Mi confianza en la precisión de la Curta es absoluta.

En mi calculadora de hace 50 años, ahora vuelta a ensamblar, divido 355 entre 113. Hago deslizar con el dedo pulgar los cursores a lo largo de los ejes estriados, y después doy una vuelta a la manivela, para introducir el primer número en la máquina. Inscribo después el segundo número, alzo la manivela y la hago girar otra vez. Los engranajes de conteo de la Curta engranan en los dientes del complemento a 9 del tambor de dientes. Ejes de transmisión de acero trasladan este movimiento mediante piñones acodados en ángulo recto y lo llevan al registro de resultados. Al hacer girar la manivela, el control, la lógica y los dígitos rotan alrededor del cigüeñal. Dos docenas de vueltas después la solución chasquea en las ventanas de resultados.

Tengo ante mí una aproximación del número pi, y más. Estoy a un mismo tiempo asiendo la heredera directa de las primeras máquinas calculadoras, el súmmum de la habilidad mecánica occidental y un monumento a la visión de un hombre al que no detuvo el peor de los muros.

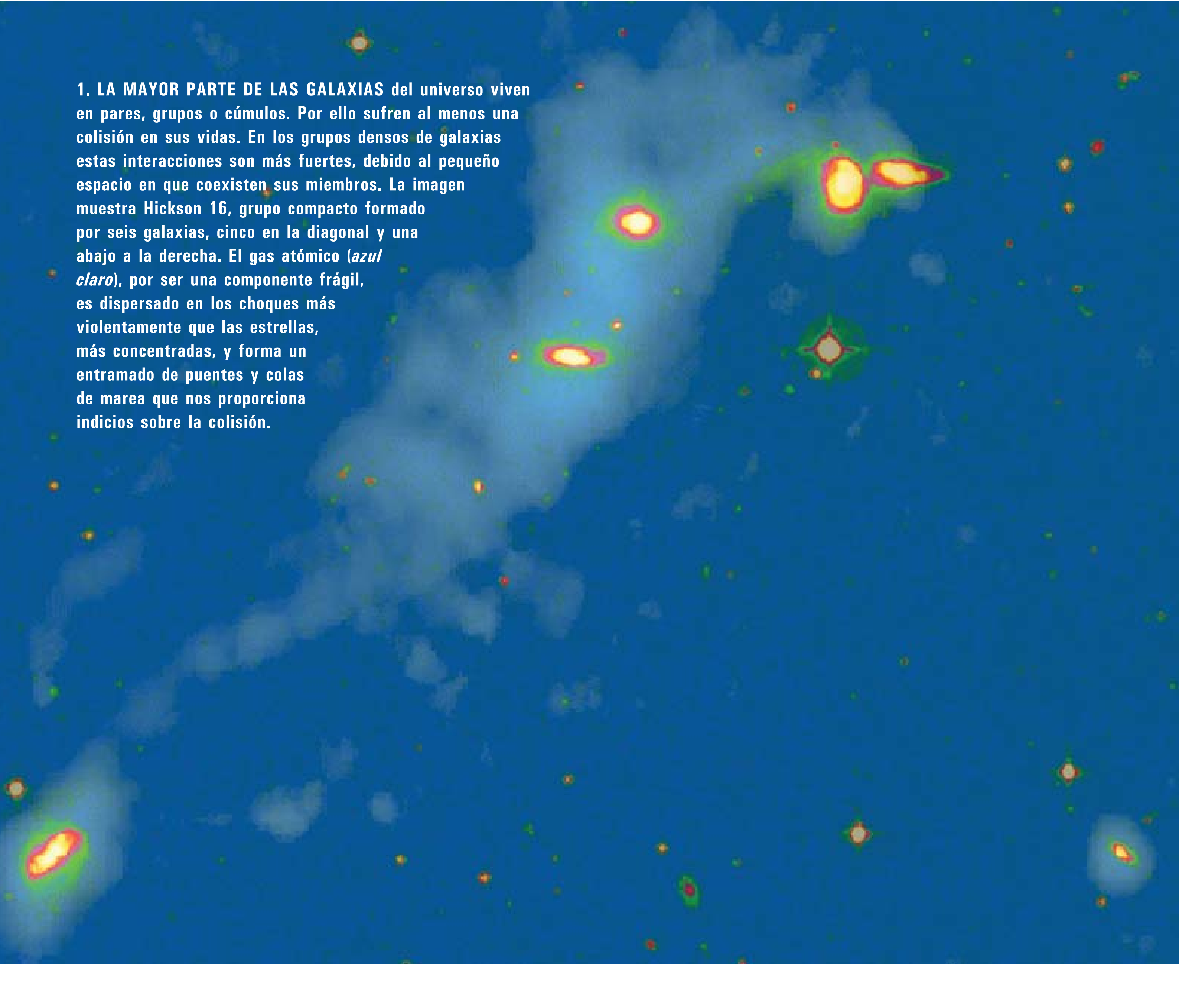
El autor

Cliff Stoll, autor de varios libros y doctor en astronomía planetaria, debe su fama a haber roto un círculo de hackers en los primeros días de Internet. Las frases de Curt Herzstark citadas en este artículo, gracias al permiso concedido por el Instituto Charles Babbage de la Universidad de Minnesota, proceden de una entrevista que el historiador Erwin Tomash le hizo en 1987.

Bibliografía complementaria

ANTIQUE OFFICE MACHINES: 600 YEARS OF CALCULATING DEVICES. Thomas A. Russo. Schiffer Publications, 2001.

THE UNIVERSAL HISTORY OF COMPUTING: FROM THE ABACUS TO THE QUANTUM COMPUTER. Georges Ifrah. John Wiley, 2001.



1. LA MAYOR PARTE DE LAS GALAXIAS del universo viven en pares, grupos o cúmulos. Por ello sufren al menos una colisión en sus vidas. En los grupos densos de galaxias estas interacciones son más fuertes, debido al pequeño espacio en que coexisten sus miembros. La imagen muestra Hickson 16, grupo compacto formado por seis galaxias, cinco en la diagonal y una abajo a la derecha. El gas atómico (*azul claro*), por ser una componente frágil, es dispersado en los choques más violentamente que las estrellas, más concentradas, y forma un entramado de puentes y colas de marea que nos proporciona indicios sobre la colisión.

Galaxias en colisión

La imagen de un universo estático e inmutable dista mucho de la realidad. Las galaxias son sistemas cambiantes que sufren transformaciones espectaculares debido a la interacción entre unas y otras

Lourdes Verdes-Montenegro



2. NGC 1300 es una galaxia barrada. Así se denominan las que presentan una estructura estelar aproximadamente recta, que se extiende a cada lado del núcleo. En los extremos de la barra empiezan los brazos. La barra abarca 150.000 años luz. La galaxia está a 75 millones de años luz de nosotros y pertenece a un poblado grupo de galaxias.

Las galaxias son sistemas cambiantes, no sólo por su propia evolución interna, sino también por la interacción gravitatoria con otras galaxias. La idea de que las colisiones constituyen un proceso fundamental en la evolución galáctica surgió a mediados de los años 70 y ha sido confirmada por las pruebas acumuladas hasta hoy.

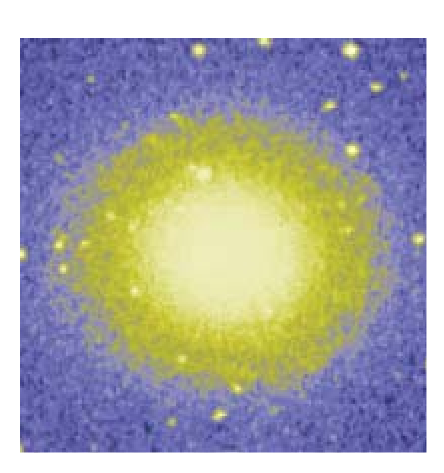
Las galaxias son inmensas fábricas de estrellas, que nacen en nubes compuestas de gas denso y polvo, las nubes moleculares. La primera generación de estrellas de una galaxia se formó a partir de los elementos primordiales, hidrógeno y helio, que se transformaron en elementos más pesados, como el hierro. Al final de su vida, las estrellas devuelven al medio interestelar la mayor parte de su masa, ya sea constituidas en supernovas o en nebulosas planetarias; quedan así las nubes enriquecidas con elementos pesados, listos para su aprovechamiento en la formación de una nueva estrella. Este proceso inicia la evolución química de las galaxias.

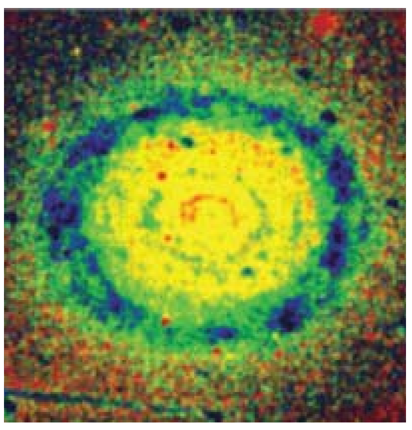
Se produce, a su vez, una evolución dinámica, debida al balance entre los movimientos internos de gas y estrellas y la fuerza de la gravedad. Ello da lugar a anillos, brazos espirales y barras; éstas son alineaciones de estrellas en una estructura aproximadamente recta que se extiende a ambos lados del núcleo de la galaxia. Normalmente los anillos se encuentran asociados a una barra, que ayuda a su formación. Sin embargo, en algunos casos, como en la galaxia triplemente anillada NGC 7217, la barra no está presente, aunque se admite que lo estuvo en el pasado. En todas estas estructuras se produce una acumulación de gas y polvo. El consiguiente aumento de densidad dispara los procesos de formación estelar, por lo que la evolución dinámica y química están interrelacionadas.

Evolución externa

La mayoría de las galaxias no se encuentran aisladas, sino conectadas con otras por la fuerza de la gravedad. La evolución externa de una galaxia viene determinada por la interacción con galaxias próximas, ya que las fuerzas de marea generadas producen una redistribución de la masa, dentro de la misma galaxia o en su expulsión hacia el exterior.

Las interacciones pueden originar acumulaciones de gas molecular en los 3000 años luz centrales de las galaxias, donde se forman discos circumnucleares debido a la pérdida de momento angular en el gas que provoca el par gravitatorio. La concentración de gas puede disparar violentos brotes de formación estelar. Este transporte de gas hacia el centro de la galaxia puede volverse más eficiente si existe una barra. De hecho, aunque las barras también se encuentran en galaxias solitarias, su frecuencia es mayor en los sistemas en interac-





3. NGC 7217 es una galaxia aislada de estructura anillada. Su luz visible (*izquierda*) se distribuye con una simetría casi perfecta. La combinación de imágenes en las bandas visibles azul y roja (*derecha*) resalta las zonas con una mayor formación estelar (*azules*) o con mayor concentración de polvo (*rojo*). En este caso nos muestra que NGC 7217 presenta 3 anillos concéntricos, siendo el exterior más prominente y de un color más azulado, debido a una mayor formación estelar en él. El intermedio, más fino, se aprecia como una circunferencia verde discontinua; el interno se observa como una pseudocircunferencia roja.

VERDES-MONTENEGRO Y COL. (*página izquierda*); GRUPO DE TELESCOPIOS ISAAC NEWTON, LA PALMA (*arriba*); VERDES-MONTENEGRO, BOSMA Y ATHANASSOULA (*abajo*)



4. ANILLO POLAR DE LA GALAXIA NGC 4650a, cuya distribución trazaría la órbita de una galaxia satélite destruida en la interacción. El anillo rota a una velocidad similar a la de la componente estelar de la galaxia.

OBSERVATORIO EUROPEO MERIDIONAL

ción. Desde finales de los años ochenta se sabe que las colisiones entre galaxias pueden determinar la aparición de barras en los discos de las galaxias.

Un caso extremo del proceso anterior nos lo ofrecen las galaxias ultraluminosas en el infrarrojo. Se piensa que el transporte de gas hacia el centro de estas galaxias en las interacciones produciría en ellas una intensa actividad de formación estelar, calentando el polvo cercano a las estrellas. El polvo reemite la radiación que recibe en el ultravioleta a longitudes de onda infrarrojas; provocan con ello que las galaxias emitan la mayor parte de su energía en el infrarrojo. Los instrumentos actuales, así el interferómetro de IRAM en Grenoble, no permiten estudiar en detalle el transporte del gas molecular hacia el centro para galaxias situadas más allá de 400 o 500 millones de años luz de nosotros.

No sólo la forma en que está distribuida la materia se ve afectada por las fuerzas de marea, sino también sus velocidades. Una galaxia en rotación perfecta presenta un campo de velocidades cuyas isolíneas adoptan una distribución característica, denominada diagrama de araña por su similitud con el animal, siendo simétrica respecto a los ejes mayor y menor de la galaxia.

Cuando una galaxia sufre una perturbación, sus ejes pueden perder la perpendicularidad o, en general, la simetría. En muchos casos la perturbación consiste en una rotación inversa o contrarrotación en las partes centrales de la galaxia, cuyo origen se atribuye a una fusión entre dos galaxias o a la incorporación de una pequeña en otra mayor. Son también frecuentes los movimientos radiales, en vez de los circulares de rotación; sucede así con el transporte de material hacia el centro.

Cuando en un choque entre dos galaxias el material sale expulsado hacia el exterior, aparecen estructuras alargadas, que semejan largas colas o plumas, o que constituyen un puente de materia entre las galaxias. El material eyectado puede volver a las galaxias, dispersarse en el medio intergaláctico o desplomarse para formar enanas de marea. En estas pequeñas galaxias, residuo de la colisión, coexisten estrellas procedentes de las galaxias que han colisionado y nuevas estrellas nacidas por la contracción del gas acumulado.

Existen perturbaciones directamente asociadas a determinados tipos de entornos: desde la fuerte distorsión sufrida por las galaxias pertenecientes a cúmulos hasta la experimentada por galaxias enanas cerca de galaxias gigantes. Son también determinantes los tipos morfológicos de las galaxias o las orientaciones relativas de sus órbitas en la colisión. Distinguiremos entre interacciones menores y mayores según que la diferencia de masas entre las dos galaxias sea o no significativa.

Interacciones menores

Uno de los ejemplos más espectaculares del resultado de una interacción entre dos galaxias de masas muy desiguales es la formación de un anillo polar, constituido por estrellas y gas, resto de una galaxia satélite, con una orientación aproximadamente perpendicular a una galaxia normal. Su observación proporciona información muy valiosa. Por un lado, la disposición del anillo se corresponde con la órbita ocupada por la galaxia satélite; por otro, permite estudiar el potencial gravitatorio en un plano adicional, perpendicular a la materia visible de la galaxia principal.

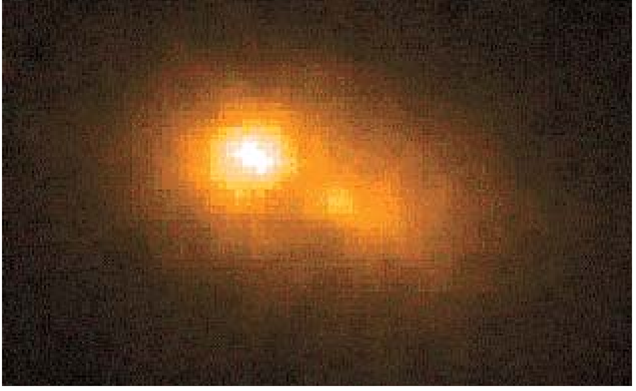
En otros casos la galaxia satélite no queda en órbita hasta su destrucción, sino que es absorbida hasta el propio centro de la galaxia mayor. De ello dan fe los núcleos dobles que se encuentran en algunas galaxias. Este modelo, postulado por T. R. Lauer, es uno de los propuestos para explicar el segundo núcleo detectado por el Telescopio Espacial Hubble en la galaxia M31 (Andrómeda). S. Tremaine ha sugerido una explicación alternativa; a tenor de

Por qué las galaxias chocan y las estrellas no

No suele haber choques entre estrellas. Distan demasiado entre sí. Del Sol a su vecina más cercana (Proxima Centauri) hay 30 millones de veces su diámetro. Esto supone que nuestro astro tendría que vivir 100.000 vidas para que existiera alguna probabilidad de que chocara con Proxima Centauri. En las asociaciones estelares la distancia se reduce a 500.000 veces el diámetro solar, y en los densos cúmulos globulares esta distancia es de 5000 diámetros.

Pero entre dos galaxias solitarias vecinas suele mediar una distancia equivalente a 60 veces su propio diámetro. Y esto sólo sucede en la cuarta parte de los casos. Las tres cuartas partes restantes de las galaxias pertenecen a grupos o cúmulos, con lo cual sufrirán al menos una colisión en su vida. Los tiempos típicos de los encuentros son de 100 millones de años.





5. DOBLE NUCLEO (*derecha*) de la galaxia de Andrómeda (*izquierda*), visto por el Telescopio Espacial Hubble. Podría deberse a la canibalización de una galaxia de su entorno.

la misma, los dos máximos de luz corresponderían a un disco de estrellas excéntrico, que gira en torno a un objeto oscuro compacto, quizás un agujero negro.

A veces es la galaxia menos masiva la que provoca en la mayor los efectos más importantes. Lo vemos ejemplificado en la galaxia-anillo de la rueda de carreta (Cartwheel), llamada así por presentar un núcleo central conectado por una serie de radios con un anillo externo. Su formación se atribuye al paso de una galaxia satélite a través del centro de la galaxia dominante, produciendo un efecto similar a la onda expansiva originada por una piedra lanzada a un estanque: cuando la compañera se acerca, las estrellas en rotación antes de la colisión son arrastradas hacia el centro, pues a la masa central de la galaxia principal se suma la de la segunda galaxia, y al alejarse se produce un rebote hacia fuera. Pero no todas las partes de la galaxia responden con la misma velocidad. Las internas, más rápidas, chocan en su expansión con las externas, que todavía están cayendo. Se genera de ese modo una onda de compresión en expansión que forma el anillo.

Interacciones mayores

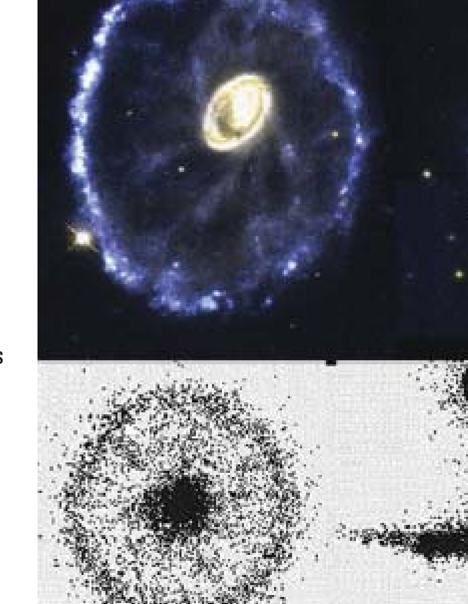
Las colisiones difieren según el número de galaxias que intervienen. Pueden participar pares de galaxias, grupos integrados por unas decenas de galaxias o cúmulos poblados por cientos o miles de galaxias, que se extienden a lo largo de más de 10 millones de años luz.

Cuando dos galaxias se cruzan, puede tener lugar un solo encuentro o formarse un sistema ligado, lo que llamamos un par de galaxias. En la interacción puede darse trasferencia de energía entre el movimiento orbital de las galaxias y sus movimientos internos, con formación consiguiente de colas, plumas y puentes de materia. Este proceso puede terminar en fusión, provocando que dos galaxias espirales creen una galaxia elíptica. La primera definición, ya clásica, de las etapas de las interacciones en pares se debe a A. Toomre, quien estableció, sobre la base de datos de 11 galaxias peculiares, la "secuencia de Toomre".

Seleccionemos dos ejemplos de los extremos de la secuencia estudiados por J. E. Hibbarb y J. H. Van Gorkom. Nos servirán para describir los principales procesos que se desarrollan conforme avanza la interacción entre dos galaxias espirales. La etapa inicial estaría bien representada por NGC 4676 (El Ratón), par en interacción formado por dos galaxias cuyos discos se encuentran aún separados, aunque por una distancia menor que su tamaño óptico. Existen colas estelares y gaseosas, así como un puente de materia, señal de intercambio de material entre las galaxias. Los discos de las galaxias presentan abundante cantidad de gas atómico.

En las etapas finales de la secuencia se genera un núcleo único con una distribución de luz característica de una galaxia elíptica como la que muestra NGC 7252. A diferencia de lo que sucede en las etapas iniciales de una fusión, el cuerpo principal está casi desprovisto de gas. La evolución final del sistema hasta una elíptica pura pasa por eliminar el gas preexistente.

Las galaxias elípticas y lenticulares no pueden formar estructuras



6. LA GALAXIA-ANILLO CARTWHEEL está formada por un anillo azulado de 150.000 años luz de diámetro, unido con el núcleo por estrellas y gas distribuidos en una estructura radial. Su imagen, tomada por una de las cámaras de gran campo del Telescopio Espacial Hubble, se muestra arriba, junto a la de dos pequeñas galaxias compañeras. Se atribuye su peculiar morfología al paso por su centro de sus dos galaxias satélite. Las simulaciones numéricas de N cuerpos realizadas por E. Athanassoula y colaboradores reproducen con gran precisión este sistema, como muestra un fotograma de la simulación, donde se observa la misma galaxia-anillo de frente (*abajo, izquierda*) y de perfil (*abajo, derecha*), tras el paso por su centro de una galaxia más pequeña que se puede ver con claridad en la representación de canto.

T. R. LAUER (KPNO/NOAO) *et al.*, HST (*arriba*); K. BORNE (STSCI) Y NASA (*galaxia-anillo Cartwheel*), E. ATHANASSOULA (*simulación*)

MATERIA OSCURA

El 90 % de nuestro universo está compuesto por material desconocido. La materia visible para nuestros ojos e instrumentos astronómicos (gas y estrellas) está en minoría respecto a la materia oscura. Su invisibilidad no ha impedido el descubrimiento de su existencia, que debemos agradecer, en última instancia, a Isaac Newton. Por él sabemos que dos cuerpos se atraen debido a su masa; una atracción que es menor cuanto mayor es la distancia. Un saltador de longitud parece liberarse de la gravedad por unos segundos debido a su velocidad, y cuanto mayor es ésta, más tiempo pasará en el aire. Si realizara el salto en un planeta más masivo debería ir más rápido para mantenerse en el aire. Este principio es perfectamente aplicable a los cuerpos celestes, incluidas las estrellas de una galaxia, o las galaxias de un cúmulo, para las que siempre habrá una relación entre velocidad y masa.

En 1932 J. Oort estudiaba el movimiento de estrellas de nuestra galaxia en la dirección perpendicular al disco. A partir de su velocidad dedujo que la masa de la Vía Láctea duplicaba al menos la observable en forma de gas y estrellas. En 1933 F. Zwicky estudió el cúmulos de galaxias de Coma. Encontró que, si la masa del cúmulo era sólo la observada, no habría podido retener a sus galaxias dotadas de altas velocidades. Para ello era preciso que la masa real fuera entre 10 y 100 veces mayor que la del gas y las estrellas.

Sabemos que el gas caliente confinado que se observa en rayos X en los cúmulos de galaxias prueba la existencia de una gran cantidad de materia no luminosa; si así no ocurriera, significaría que el gas se habría dispersado hace tiempo. En los años setenta los avances instrumentales permitieron medir las velocidades de rotación de las estrellas y el gas de una galaxia espiral a diferentes distancias del centro. Se observó que en las partes externas de numerosas galaxias, donde la gravedad debía ir disminuyendo, el gas y las estrellas giraban con tal velocidad, que habrían debido ser expelidas de sus órbitas, salvo que una masa mayor que la visible las retuviera en ellas. Dicha masa se encontraría formando halos invisibles. Estos resultados confirmaron, pues, la existencia de la materia oscura también fuera de los cúmulos.

La relatividad general predice que la luz se desvía de su trayectoria al pasar cerca de una gran masa. Este objeto masivo, que puede ser tanto una estrella como un cúmulo de galaxias, recibe el nombre de lente gravitatoria. La deformación producida por las lentes gravitatorias es mayor cuanto lo es su masa, y este hecho ha mostrado también la discrepancia entre la materia total y la luminosa en los cúmulos de galaxias.

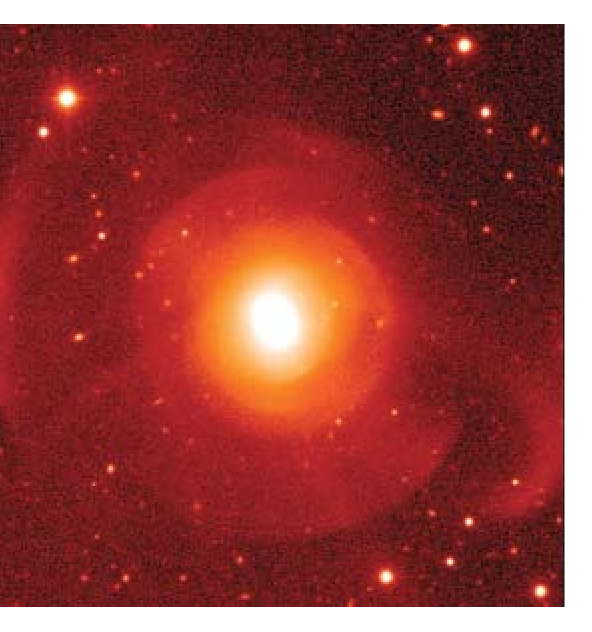
largas y finas como las espirales, pues son sistemas con mayor dispersión de velocidades o agitación. Cuando sufren una interacción, suelen aparecer envueltas en unas conchas o capas concéntricas de estrellas y a veces gas con un espesor considerablemente mayor. Las simulaciones sugieren que las conchas o capas se producen al interactuar una elíptica o lenticular con otra galaxia que le transfiere material. Es también posible que la acreción de una galaxia satélite produzca también estas estructuras. Las conchas, como las colas de marea de NGC 7252, constituirían, pues, restos de las galaxias iniciales que aún no se han asentado en el cuerpo final, y la formación de unas u otras estaría condicionada por las órbitas y masas relativas de las galaxias que han colisionado.

Grupos de galaxias

En una escala de perturbación gravitatoria creciente, los grupos de galaxias ocupan un lugar intermedio entre los pares y los cúmulos de galaxias dentro de la jerarquía de las interacciones. El ejemplo más próximo nos lo ofrece el Grupo Local, integrado por unas 30 galaxias que ocupan un diámetro del orden de 10 millones de años luz. En su interior se producen colisiones: nuestra misma Vía Láctea pudo haber experimentado una interacción con las nubes de Magallanes en los últimos mil millones de años. El Grupo Local se halla también en interacción con el exterior, en particular con otros grupos cercanos: Maffei 1, Sculptor, M81 o M83.

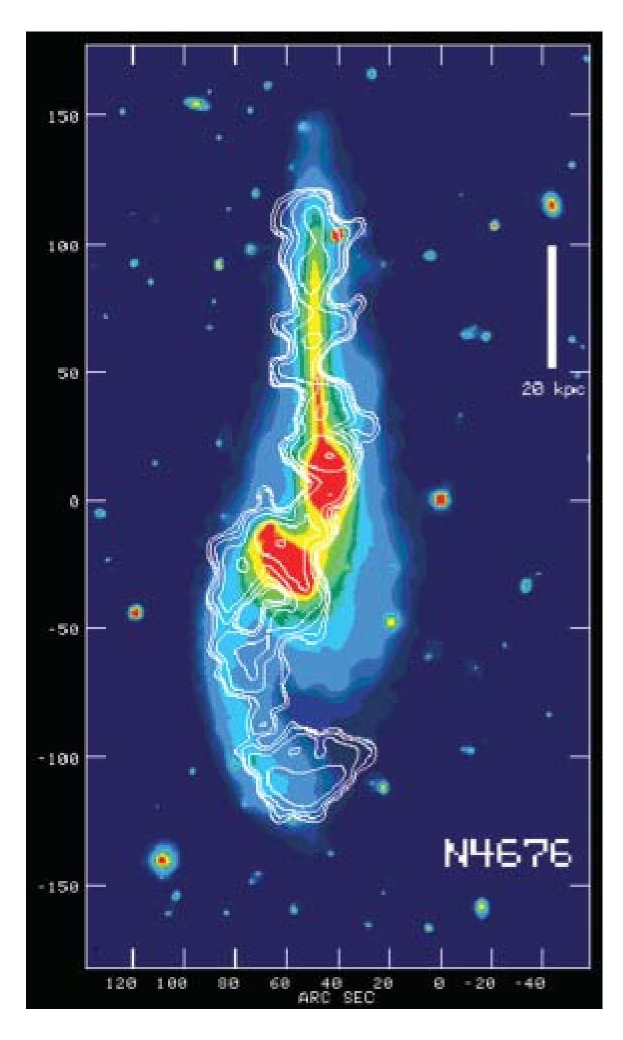
Merecen una atención especial los *grupos compactos*, los sistemas aislados de galaxias más densos del universo. En ellos se alcanzan concentraciones de galaxias similares a las de los centros de los cúmulos ricos, cohabitando en un espacio muy pequeño entre 4 y 10 galaxias, de manera que a menudo sus discos están en contacto. Por todas estas razones se espera que las colisiones en ellos sean continuas e intensas. Constituyen laboratorios únicos para el estudio de la interacción y evolución de galaxias.

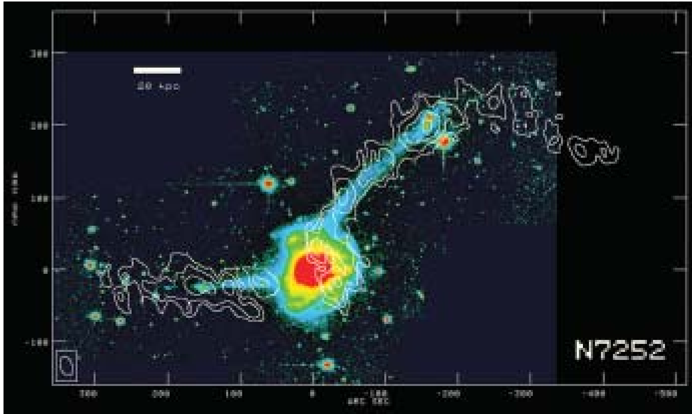
Nuestro equipo ha realizado un estudio del gas atómico, combinando datos sobre el contenido total de gas y su distribución, a partir del cual hemos propuesto para los grupos compactos un esquema evolutivo. Hemos encontrado que el gas atómico de tres cuartas partes de las galaxias de los grupos presenta al-



7. NGC 474 es una galaxia lenticular que pertenece al sistema en interacción Arp 227. Los arcos de su alrededor la incluyen entre las galaxias "concha". Las simulaciones numéricas de este sistema indican que las ondas observadas se han podido formar por interacción de NGC 474 con otra de las galaxias del sistema, NGC 470.

F. SCHWEIZER, OBSERVATORIOS CARNEGIE





8. EXTREMOS DE LA SECUENCIA DE TOOMRE, representados por NGC 4676 (*izquierda*) y NGC 7252 (*arriba*). Esta secuencia define las etapas que llevan desde la interacción de dos galaxias espirales hasta su fusión final para formar una galaxia elíptica. Las imágenes muestran, en contornos blancos, líneas de igual densidad superficial de hidrógeno atómico y, en color, la emisión estelar. Las barras blancas corresponden a un tamaño de 20 kiloparsec, es decir, unos 65.000 años luz. En NGC 4676 (conocida como El Ratón), las galaxias están en contacto, pero los núcleos se encuentran aún separados. La interacción ha provocado colas de marea que se ven tanto en la luz estelar como en el gas neutro, aunque este último es menos intenso en comparación. NGC 7252 representa una etapa próxima al final de la secuencia, pues se observa un cuerpo central con una distribución estelar correspondiente a una galaxia elíptica, como se deduce del análisis de su perfil de luz.

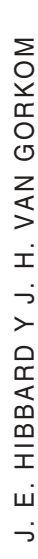
teraciones: son los grupos deficientes en gas atómico. Existe una serie de grupos en estados poco evolucionados, pues las galaxias apenas presentan perturbaciones. A medida que los grupos evolucionan, el contenido total de gas atómico se mantiene constante, pero no su distribución, pues escapa de las galaxias y pasa a formar parte de colas y puentes de marea.

En las etapas evolutivas más extremas de los grupos, el gas ya ni siquiera se encontraría en la zona intergaláctica. En el grupo Hickson 40, el gas atómico sólo se detecta en dos pequeñas zonas de los extremos de dos de las galaxias miembro, faltando un 90 % del gas que tendrían si las galaxias estuvieran aisladas. Se han observado grupos en los que se forma una gran nube de hidrógeno atómico, con una sola estructura de velocidades. Las cuatro galaxias que conforman Hickson 49 se hallan incluidas en una nube que gira como un todo.

¿Cómo desaparece el hidrógeno atómico en los grupos? Una vez arrancado de las galaxias, pensamos que el gas queda expuesto a su destrucción o calentamiento. De la comparación de los grupos compactos con otros entornos donde también se encuentra menos cantidad de gas atómico de la esperada se desprende que, en los grupos compactos, se dan niveles de deficiencia del mismo orden que en las galaxias del centro de los cúmulos de Virgo o Coma. La deficiencia en los cúmulos se debe a la existencia de un medio caliente intracumular; si el mecanismo fuera similar en los grupos, el gas arrancado de las galaxias se estaría destruyendo por calentamiento. Pero no está claro que en los grupos se produzca un mecanismo similar al de los cúmulos, pues

Simulaciones numéricas

En las simulaciones numéricas, el ordenador aplica leyes físicas conocidas a un conjunto de partículas que representan el gas y las estrellas de las galaxias. A partir de diferentes condiciones iniciales, se promueve la evolución del sistema mediante el cálculo de las fuerzas de interacción en distintas posiciones y tiempos. Se analizan finalmente los resultados obtenidos. Con ello se puede comprimir en unos pocos segundos miles de millones de años. Superordenadores, redes de computadores personales u ordenadores GRAPE —cuyo cableado está diseñado específicamente para el cálculo de las fuerzas gravitatorias— permiten hacer evolucionar hasta varias decenas de millones de partículas en unos pocos segundos.



CONOCER LO NORMAL PARA COMPRENDER LO EXTRAÑO

El primer problema que surge en el estudio de las galaxias en interacción es que, para identificar las características debidas al choque, es necesario saber cómo las veríamos si no estuvieran colisionando.

En algunos casos parece evidente la existencia de una interacción y sus efectos; por ejemplo, en las imágenes tomadas por el VLT de la pareja de galaxias NGC 6872/IC 4970 se aprecia con claridad que IC 4970 está desgajando uno de los brazos de NGC 6872: los colores más azulados de dicho brazo pueden asociarse a formación estelar provocada por la interacción.

Pero las cosas no son siempre tan fáciles. Ignoramos por qué galaxias virtualmente aisladas presentan características atribuidas a las interacciones, como es el caso de NGC 1156, que registra intensos brotes de formación estelar. Se hace indispensable el estudio de una muestra grande de galaxias aisladas que sirva de patrón de normalidad. En esa tarea se han empeñado numerosos equipos; la autora coordina un proyecto formado por S. Leon, U. Lisenfeld, D. Espada, E. García y S. Verley, en el Instituto de Astrofísica de Andalucía de Granada, J. Sulentic del Departamento de Astronomía de la Universidad de Alabama, W. Huchtmeier del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn, M. S. Yun, de la Universidad de Massachusetts, S. Odewahn, de la Universidad de Arizona, y S. del Río del INAOE en Puebla, que pretende aunar y completar los datos existentes. Para ello hemos elaborado una muestra compuesta por más de 700 galaxias (NGC 1156 se encuentra entre ellas). Actualmente estamos llevando a cabo una revisión de la morfología y nivel de aislamiento de las galaxias del catálogo, con el fin de seleccionar una muestra de referencia en la que la influencia del entorno sea mínima y cuya evolución esté determinada por sus propiedades intrínsecas. A partir de una información multifrecuencia completa concerniente a las estrellas y al medio interestelar estaremos en la mejor posición para evaluar las propiedades de galaxias en interacción.

aquéllos están formados por entre 10 y 100 veces más galaxias, que se mueven a velocidades 10 veces mayores.

Cúmulos de galaxias

Los cúmulos constituyen los objetos mayores del universo en cuya organización la fuerza de la gravedad desempeña un papel determinante. En su interior se abriga el 10 % de las galaxias. Los hay pobres, con unos cientos de galaxias, como en el caso de Virgo, y ricos, con miles de miembros, como el cúmulo de Coma. Por su forma se clasifican en esféricos y amorfos. Los cúmulos esféricos (así Coma) suelen estar poblados por un gran número de galaxias elípticas, mientras que los amorfos, entre ellos Virgo, presentan más variedad de tipos. Las interacciones entre galaxias tienen aquí una naturaleza diferente de las producidas en los demás entornos, debido a las enormes velocidades relativas de las galaxias, que alcanzan miles de kilómetros por segundo.

Ahora bien, una mayor diferencia de velocidad entre las galaxias que sufren el encuentro no conlleva mayores estragos en las colisiones, sino lo contrario. Los cho-



9. PAR DE GALAXIAS EN INTERACCION NGC 6872/IC 4970: En esta imagen se muestra una composición de tres colores (*azul, verde y rojo*) tomada con la cámara FORS1 del telescopio ANTU del VLT de las galaxias NGC 6872 (*la espiral barrada que ocupa la diagonal de la imagen*) e IC 4970 (una pequeña galaxia lenticular situada por encima del centro de la figura). El brazo superior de NGC 6872 presenta el aspecto de estar siendo desgajado por su pequeña compañera IC 4970. Se observan zonas de colores más azules que las del brazo opuesto, característicos de regiones de formación estelar. En la parte inferior derecha de la galaxia aparece una estrella que pertenece a nuestra galaxia, sin nada que ver con el sistema en cuestión.

OBSERVATORIO EUROPEO MERIDIONAL

ques a alta velocidad, salvo que sean exactamente frontales, hacen que las galaxias pasen muy escaso tiempo a corta distancia y, además, tienen pocas posibilidades de quedar ligadas gravitacionalmente.

Pero la mayor parte de la materia luminosa de los cúmulos no está en las galaxias, sino entre ellas, en forma de un gas muy caliente, atrapado por la fuerza gravitatoria del conjunto. Este medio intracúmulo se compone, sobre todo, de hidrógeno y helio, por lo que se le supone residuo de las nubes engendradoras de las galaxias, nubes que fueron calentadas por la energía liberada durante el colapso gravitatorio. Asimismo se han encontrado elementos más pesados, especialmente hierro, cuya existencia indica que ha tenido lugar también un enriquecimiento del medio original. Su presencia se atribuye al barrido del material más exterior de las galaxias en su desplazamiento por el cúmulo, así como a la existencia de vientos galácticos producidos por explosiones múltiples de supernovas, que permiten que estos elementos pesados escapen no sólo del interior de las estrellas, donde se forman, sino también de las galaxias. Importa, asimismo, el estudio de la distribución del gas, que es un reflejo del estado evolutivo del cúmulo. A su paso por el centro del cúmulo, las galaxias pierden el gas atómico de las partes

LA REALIDAD DE LOS GRUPOS COMPACTOS DE GALAXIAS

Los grupos compactos de galaxias se conocen desde hace más de un siglo, pero el primer catálogo realizado con criterios definidos de aislamiento, compacidad y número de miembros es el elaborado por P. Hickson, que en 1982 identificó 100 de estos grupos. La muestra original ha sido ampliada en el hemisferio sur por I. Prandoni y sus colaboradores en 1994.

Una de las principales sorpresas que estos grupos depararon fue el pequeño rango de velocidades mostrado por sus miembros o "dispersión de velocidades", del orden de 200 kilómetros por segundo, que junto con la elevada densidad de galaxias hace que los tiempos característicos de los cruces entre galaxias sean "pequeños", del orden de mil millones de años. En esta situación las primeras simulaciones numéricas predijeron que las galaxias que los componen deberían fusionarse rápidamente. Por ello algunos autores cuestionaron su existencia real, aunque numerosas observaciones posteriores han proporcionado pruebas en contra de esta hipótesis.

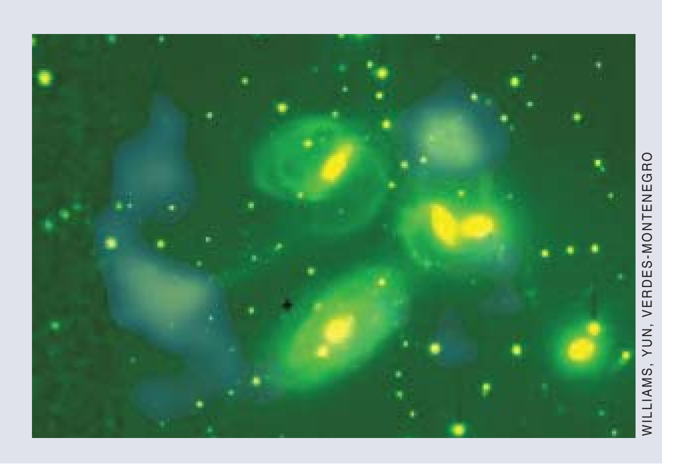
La componente estelar de las galaxias de los grupos muestra perturbaciones morfológicas y cinemáticas en un 45 % de los casos, según el estudio realizado por C. Mendes de Oliveira y P. Hickson. Nuestro equipo, formado por M. S. Yun, de la Universidad de Massachusetts, W. Huchtmeier, del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn, B. W. Williams, de la Universidad de Delaware, y A. del Olmo y J. Perea, del Instituto de Astrofísica de Andalucía en Granada, ha estudiado la distribución y cinemática del gas atómico en 16 grupos compactos mediante el interferómetro centimétrico del VLA, encontrando signos obvios de perturbaciones en el 70 % de las galaxias de los grupos.

La emisión intergaláctica constituye en sí misma una muestra de que se trata de un grupo real y no formado por galaxias inconexas. Otra interesante característica de los grupos es que presentan un 40 % menos de hidrógeno atómico que las galaxias aisladas, como revelamos en nuestro estudio. En resumen, el estudio de la componente estelar de los grupos así como del gas frío y caliente ha evidenciado la existencia de interacciones múltiples entre las galaxias miembro.

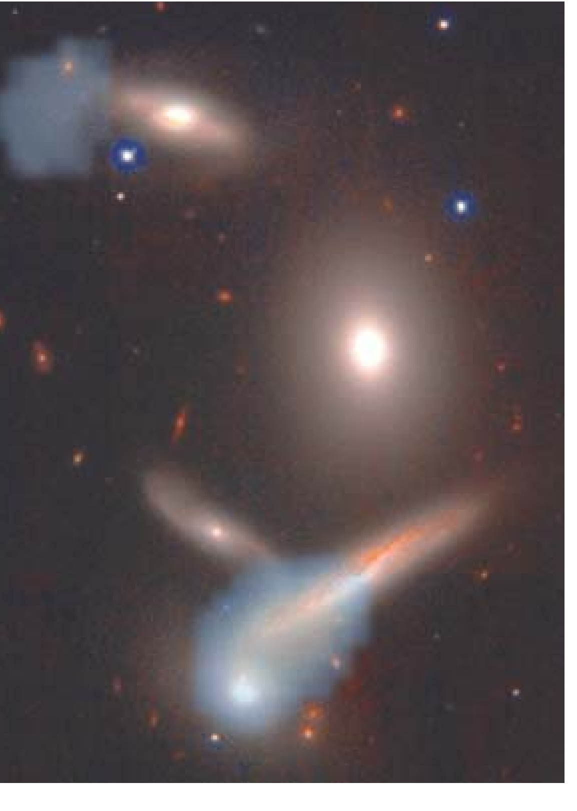
Demostrada la existencia de los grupos compactos, se han propuesto diferentes modelos para explicar su naturaleza. Según A. Diaferio y sus colaboradores, los grupos compactos podrían formarse de manera continua dentro de grupos ricos, aunque no hay pruebas de que estén inmersos en tal entorno.

Para F. Governato y sus colaboradores, habría una etapa inicial de interacciones fuertes, muy anterior a la época actual, en la que se habría eliminado material de las galaxias. Esto habría disminuido su área eficaz frente a ulteriores interacciones, haciendo que la evolución posterior se ralentizara. En la actualidad la evolución estaría controlada por caídas secundarias de galaxias que realimentarían a los grupos cada cierto tiempo.

El modelo de Governato parece de aplicación en algunos casos, como el del Hickson 92 (Quinteto de Stephan); sin embargo, otros grupos se encuentran muy bien aislados, por lo que no existen obvios candidatos para las caídas secundarias. En estos casos viene en nuestra ayuda el modelo esbozado por E. Athanassoula y su grupo. De acuerdo con su hipótesis, un halo de materia oscura suficientemente masivo y no concentrado hacia el centro podría proporcionar un potencial gravitatorio en el que la vida de los grupos sería considerablemente mayor de lo esperado.


WILLIAMS, YUN, VERDES-MONTENEGRO

EL QUINTETO DE STEPHAN es un grupo compacto de galaxias del catálogo de Hickson (Hickson 92) descubierto por E. Stephan en 1877. En la imagen vemos sus cuatro miembros principales, junto con una galaxia (*centro de la parte inferior de la imagen*) que no tiene relación ninguna con Hickson 92; en realidad forma parte de otro grupo de galaxias diez veces más cercano a nosotros. Sobre esta imagen en luz visible se puede apreciar la distribución del gas atómico (*azul claro*), al que las interacciones han hecho salir de las galaxias para formar nubes intergalácticas y colas de marea.



10. HICKSON 40 es un grupo compacto formado por 5 galaxias. El gas atómico (*azul claro*) ya apenas se encuentra ni en las galaxias ni entre ellas; se trata, pues, de un grupo en una etapa evolucionada.

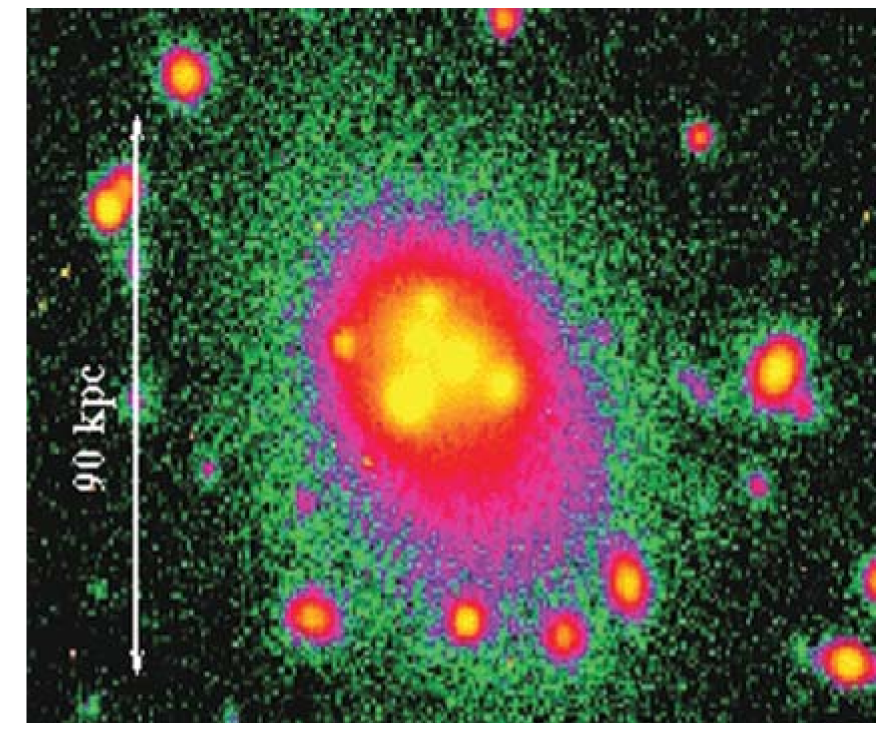
externas, de menor densidad, conservando el gas molecular, de mayor densidad y concentrado en la zona central de las galaxias.

Además de las interacciones entre galaxias, similares a las que se encuentran en pares o grupos, y de las galaxias con el medio intracúmulo, hay un tercer tipo de interacción denominado canibalismo galáctico. En el centro de los cúmulos hay galaxias cD, gigantes, que atraen y absorben a las más pequeñas. Son las galaxias más grandes que se conocen en el universo.

Los cúmulos pueden también sufrir interacciones “externas”, es decir, considerados como una sola entidad; sucede eso cuando incorporan grupos cercanos por acción de su intensa gravedad; colisionan incluso con otros cúmulos. La interacción está, sin embargo, limitada por la expansión del universo, que, al aumentar la distancia entre todas las galaxias, dificulta el encuentro entre cúmulos.

¿Se forman los cúmulos ricos en galaxias por unión de cúmulos pobres o grupos? Esto predicen algunos modelos cosmológicos, lo cual produciría choques a muy alta temperatura en el medio intracúmulo y se esperaría ver menos cúmulos ricos en el pasado. Existen indicios que apoyan esas hipótesis, pero es necesario observar un número significativo de cúmulos distantes con mejor resolución y comparar los cúmulos más lejanos, y por tanto mas jóvenes con los actuales.

Las observaciones más recientes nos han mostrado que en el pasado los choques y fusiones entre galaxias eran más frecuentes que en la actualidad. Estos resultados apoyan la idea de que las interacciones no sólo constituyen un proceso fundamental en la evolución galáctica, sino que las galaxias actuales se originaron a partir de colisiones entre galaxias primigenias.



11. EL CANIBALISMO es un fenómeno frecuente en los cúmulos de galaxias, donde una galaxia gigante se alimenta de “pequeñas” galaxias que se aproximan a ella, como es el caso de Abell 3827, que aparece en esta imagen de falso color rodeada de más de una decena de galaxias cuyo tamaño es similar al de nuestra Vía Láctea. Es, por tanto, el tamaño monstruoso de la galaxia caníbal el que las hace parecer enanas. En el interior de ella se pueden apreciar algunas recientemente fagocitadas.

VERDES-MONTENEGRO Y COL. (*arriba*); M. J. WEST (U. ST. MARY), TELESCOPIO ESO 1-M (*abajo*)

La autora

LOURDES VERDES-MONTENEGRO pertenece al Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC) en Granada, en el que realizó su tesis doctoral seguida de un posdoctorado en el Observatorio de Marsella. En la actualidad estudia los efectos de la interacción en el medio interestelar de los grupos compactos de galaxias y coordina desde el IAA una colaboración internacional para generar una base de datos de galaxias aisladas.

Bibliografía complementaria

THE THREE RINGS OF THE ISOLATED GALAXY NGC 7217. L. Verdes-Montenegro, A. Bosma, E. Athanassoula en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 300, página 65; 1995.

AN HI ROGUES GALLERY. J. E. Hibbard, J. H. Van Gorkom, M. P. Rupen, D. Schiminovich en *Gas & Galaxy Evolution: A conference in honour of the 20th anniversary of the VLA, ASP Conferences Series*, vol. 240, pág. 659; 2001.

WHERE IS THE NEUTRAL ATOMIC GAS IN HICKSON GROUPS? L. Verdes-Montenegro, M. S. Yun, B. A. Williams, W. K. Huchtmeier, A. del Olmo, J. Perea en *Astronomy and Astrophysics*, vol. 377, pág. 812; 2001.

Bases moleculares de la esquizofrenia

Gracias a una mejor comprensión de los mecanismos de señalización cerebral en los pacientes esquizofrénicos están apareciendo nuevos enfoques y perspectivas terapéuticas esperanzadoras

Daniel C. Javitt y Joseph T. Coyle

Al oír la palabra "esquizofrenia" quizá la asociemos a John Nash y Andrea Yates. Nash, protagonista de *Una mente maravillosa*, fue un prodigio de las matemáticas que recibió el premio Nobel por su trabajo precoz. Sin embargo, pisado el umbral de la edad adulta, su cerebro se alteró de tal manera, que arruinó su carrera académica. Tardó muchos años en recuperarse. Yates, una madre que padece depresión y esquizofrenia, ahogó a sus cinco hijos en una bañera para "salvarlos del demonio". Actualmente se encuentra en prisión.

Nash y Yates constituyen ejemplos en parte típicos y en parte atípicos. Aproximadamente el uno por ciento de la población mundial padece esquizofrenia. De éstos, la mayoría permanecen incapacitados durante toda su vida. A diferencia de Nash, muchos poseen una inteligencia por debajo de la media, incluso antes de que aparezcan los primeros síntomas. Cuando la enfermedad se asienta, típicamente en la edad adulta, sufren un descenso de su cociente intelectual. Por desgracia, sólo una minoría consigue empleo digno.

A diferencia de Yates, no llegan a la mitad los que contraen matrimonio o forman una familia. Alrededor del 15 por ciento reside durante largos períodos en centros de salud mental. Otro 15 por ciento termina en la cárcel por delitos menores. Un 60 por ciento vive en la pobreza y uno de cada 20 acaba durmiendo en la calle. Un escaso apoyo social propicia que las personas con esquizofrenia se cuenten más entre las víctimas que entre los criminales.

Los fármacos que se utilizan para tratar esta enfermedad dejan mucho que desear. Los antipsicóticos, los más socorridos, suspenden los síntomas en sólo el 20 por ciento de los pacientes. Los que tienen la suerte de responder al tratamiento se man-

1. EL MUNDO INTERIOR de las personas con esquizofrenia resulta a menudo confuso. En él se mezclan voces extrañas, paranoia y pensamientos ilógicos como los que se pueden leer (en inglés) en esta imagen: '¡No lo hagas!', 'Te han pillado', 'tartaja, tartaja, tartaja', 'Te están espiando', '¿Por qué dijo eso?', '¿Dónde está mi mano?', '¿Quiénes son ésos?', 'Es malo, muy malo'...

COOP PHOTO ART COLLECTIVE

WHY DID HE SAY THAT????
DO IT!!!!
DON'T DO IT!!!!
HE SAID NOT TO TELL
THEY GOT YOU
HE'S EVIL.....
.....NO HE IS NOT.....
.....YES HE IS.
JABBER, JABBER,
JABBER.
HE KNOWS ABOUT ME??
THEY ARE WATCHING YOU.
WHERE IS MY HAND?
WHO WE ARE IS WHO THEY ARE.
HA, YOU THOUGHT
YOU'D GET AWAY
THEY CAN SEE
WHY DID HE SAY THAT???

tienen en buen estado siempre que no lo interrumpan. Muchos, sin embargo, terminan por abandonar la medicación por causa de los efectos secundarios, por un deseo de sentirse "normal" o por la pérdida de acceso a la atención psiquiátrica. Dos tercios consiguen cierto alivio con los antipsicóticos, aunque los síntomas persisten durante toda la vida. El resto ni siquiera responde al tratamiento.

Además de la escasez de recursos medicamentosos, existe otro factor que obstaculiza el tratamiento de este trastorno cruel: las hipótesis que orientan el desarrollo farmacológico. Las neuronas se comunican entre sí mediante la liberación de neurotransmisores, moléculas que excitan o inhiben otras neuronas. Durante decenios, los estudios de la esquizofrenia se han centrado en un solo neurotransmisor: la dopamina. En estos últimos años, sin embargo, ha quedado claro que la alteración de los niveles de dopamina constituye sólo una fracción de un todo más amplio. Para muchos, las alteraciones responsables de la enfermedad hay que buscarlas en otra parte. La sospecha recae, en particular, sobre la deficiencia de glutamato, otro neurotransmisor. Dado que la esquizofrenia afecta a todas las zonas del cerebro y, a diferencia de la dopamina (que desempeña una función importante sólo en regiones aisladas), el glutamato resulta crítico en casi todas ellas, las investigaciones se centran ahora en tratamientos que compensen el déficit de glutamato.

Multiplicidad de síntomas

Para mejorar el tratamiento de la esquizofrenia resulta indispensable ahondar en la comprensión de sus causas, así como de todos los síntomas. Estos se agrupan en tres categorías: positivos, negativos y cognitivos. Por síntomas positivos se entienden aquellos que van más allá de la experiencia normal. Los negativos connotan generalmente una experiencia mermada. Los cognitivos, o "desorganizados", se relacionan con la dificultad para seguir una conversación fluida, lógica y coherente, para mantener la atención y para el pensamiento abstracto.

Los síntomas positivos son los más populares: agitación, ilusiones paranoides (en las que el paciente imagina que conspiran contra él) y alucinaciones, habitualmente en forma de voces. Las alucinaciones relacionadas con órdenes, en las que las voces mandan al paciente autolesionarse o hacer daño a otros, constituyen un signo especialmente ominoso. Difíciles de resistir, pueden desencadenar acciones violentas.

Los síntomas negativos y cognitivos, aunque menos espectaculares, resultan más perniciosos. Incluyen el grupo de las "cuatro Aes": *a*utismo (pérdida de interés por los demás o el entorno), *a*mbivalencia (coexistencia de emociones opuestas), *a*fecto embotado (expresión facial insulsa y sin cambio) y *a*sociación despegada (unión de pensamientos sin una lógica clara y mezcla de palabras en una auténtica ensalada verbal). Entre los síntomas comunes también se incluyen la falta de espontaneidad, la pobreza de lenguaje, la dificultad para establecer vínculos y la lentitud de movimientos. La apatía y el desinterés pueden causar fricciones entre pacientes y familiares, quienes a menudo interpretan esas alteraciones como signos de pereza en vez de lo que son: manifestaciones de la enfermedad.

A tenor de los resultados obtenidos mediante tests escritos, las personas con esquizofrenia sufren una extensa disfunción. Todas las operaciones cerebrales, desde el procesamiento sensorial básico hasta los aspectos más complejos del pensar, aparecen en buena medida alteradas. En particular, se resienten la formación de memoria (a corto o largo plazo) y la resolución de problemas complejos. Los pacientes presentan también dificultad para desenvolverse en la vida diaria; describir, por ejemplo, para qué están los amigos o qué hacer si, de repente, se va la luz. Por encima de cualquier otro motivo, en la incapacidad para manejarse en los problemas comunes reside el obstáculo principal para que los esquizofrénicos se valgan por sí mismos. En su conjunto, pues, la esquizofrenia expropia las cualidades que la gente necesita para vivir en sociedad: personalidad, destrezas sociales y sentido común.

Más allá de la dopamina

La dopamina se empezó a considerar un elemento clave en el desarrollo de la esquizofrenia a partir de los años cincuenta, cuando un descubrimiento fortuito reveló que las fenotiazinas, una familia de fármacos, podía controlar los síntomas positivos de ese trastorno mental. La investigación ulterior demostró que estas sustancias bloqueaban la acción de los receptores D2 de la dopamina, un grupo específico de sensores químicos. Estas estructuras se encuentran en la superficie de determinadas células nerviosas y transportan las señales de la dopamina hasta el interior celular. Paralelamente, Avid Carlson descubrió que la anfetamina, de la que se conocía su capacidad inductora de alucinaciones y distorsiones, estimulaba la liberación de dopamina en el cerebro.

A partir de esos dos hallazgos se llegó a la "tesis de la dopamina", que establece: la mayoría de los síntomas de la esquizofrenia provienen de un exceso de liberación de dopamina en el sistema límbico (regulador de las emociones) y los lóbulos frontales (implicados en el

Resumen/Esquizofrenia

- Durante largo tiempo se ha venido sosteniendo que la raíz de la esquizofrenia se encontraba en la alteración de un sistema particular del cerebro; a saber: el que se sirve de la dopamina para la comunicación entre neuronas.
- La ciencia comienza ahora a dirigir su atención hacia un neurotransmisor distinto, el glutamato, cuya función señalizadora aparece muy alterada. Podría, en efecto, desempeñar un papel importante en el trastorno.
- Ya se están buscando fármacos acordes con las nuevas ideas sobre el origen de la esquizofrenia.

razonamiento abstracto), regiones muy importantes del cerebro.

En los últimos 40 años se ha hecho patente la potencia encerrada en esa teoría. También sus limitaciones. La teoría se corrobora, sobre todo, en los pacientes que evidencian síntomas positivos prominentes. La sintomatología encaja y el tratamiento resulta eficaz. La minoría de los que presentan sólo manifestaciones positivas logra llevar una vida aceptable —con empleo, familia y merma irrelevante de las capacidades cognitivas con el tiempo—, siempre y cuando no abandone la medicación.

Pero la tesis de la dopamina falla en numerosos casos. Nos referimos a los enfermos cuya sintomatología emerge de manera gradual, no de repente; los signos negativos eclipsan en ellos a los positivos. Estos esquizofrénicos viven retraídos, aislados en su mundo durante años. Muestran una escasa actividad cognitiva; con suerte, mejoran algo si reciben un tratamiento farmacológico idóneo.

Ante tantos fracasos, no ha habido más remedio que modificar la tesis de la dopamina. Así algunos atribuirían los síntomas negativos y cognitivos a una bajada de la concentración de dopamina en los lóbulos frontales y a un aumento de la misma en el sistema límbico. Dado que en el lóbulo frontal predominan los receptores de dopamina del tipo D1, se ha comenzado a investigar, por ahora sin éxito, fármacos que estimulen los receptores D1 y, al propio tiempo, inhiban los D2.

A finales de los años ochenta se comprobó que ciertos fármacos —la clozapina (Clozaril)— parecían provocar menos rigidez y otros efectos secundarios de orden neurológico que los medicamentos tradicionales, como la clorpromazina (Thorazine) o haloperidol (Haldol). Resultaban, además, de mayor eficacia en el tratamiento de síntomas positivos y negativos persistentes. La acción inhibidora de la clozapina, un antipsicótico atípico, sobre los receptores de la dopamina no era tan enérgica como la operada por los medicamentos tradicionales, pero sí muy eficaz ante otros neurotransmisores.



2. LA PERCEPCION DE FRAGMENTOS como partes de un todo puede resultar difícil para personas con esquizofrenia. Al observar imágenes secuenciales como las que aparecen en la figura, los sujetos normales identifican rápidamente un reloj. A los esquizofrénicos les cuesta de dar ese salto.

COOP PHOTO ART COLLECTIVE

Estos descubrimientos condujeron al desarrollo y a la adopción masiva de nuevos antipsicóticos atípicos que se basaban en el mecanismo de acción de la clozapina. (Algunas de tales moléculas, se sabría después, pueden producir diabetes y otros efectos secundarios inesperados.) La dopamina dejó de considerarse el único neurotransmisor alterado en la esquizofrenia.

Las teorías centradas en la concentración irregular de dopamina siguen sin explicar por qué un individuo con esquizofrenia responde al tratamiento, mientras que otro no experimenta mejora alguna. Tampoco justifican por qué se obtiene mayor éxito con los síntomas positivos que los negativos o los cognitivos. Además, y a pesar de decenios de investigación, no se ha hallado todavía ningún indicio concluyente sobre el papel de la dopamina: ni las enzimas que catalizan este neurotransmisor ni los receptores a los que se une aparecen suficientemente alterados como para dar cuenta de toda la sintomatología esquizofrénica.

Similitudes con la fenciclidina

Si la dopamina no constituye la razón última de la esquizofrenia, ¿dónde buscar el eslabón perdido? La fenciclidina (PCP) ofrece una buena pista. En contraposición con la anfetamina, que imita sólo los síntomas positivos, la PCP induce todo el amplio abanico de manifestaciones asociadas a la esquizofrenia: negativas y cognitivas y, en ocasiones, positivas. Estos efectos se observan no sólo en individuos que abusan de la fenciclidina, sino también en los que reciben dosis bajas y esporádicas de PCP o cetamina (un anestésico con efectos semejantes) en pruebas controladas.

Varios estudios acometidos en los años sesenta establecieron paralelismos entre los efectos de la PCP y los síntomas de la esquizofrenia. Demostraron, por ejemplo, que los individuos que recibían PCP presentaban la misma dificultad para interpretar refranes que los pacientes con esquizofrenia.

La investigación, más reciente, con cetamina indica semejanzas más

CEREBRO CON ESQUIZOFRENIA

MUCHAS REGIONES Y SISTEMAS del cerebro operan de forma incorrecta en el trastorno de esquizofrenia. Durante algún tiempo se pensó que el origen de esta enfermedad yacía en la concentración irregular de la dopamina, un neurotransmisor. Pero la investigación reciente apunta en otra dirección: a tenor de la misma, la clave residiría en el glutamato, un neurotransmisor de mayor difusión. Habría una señalización empobrecida de los receptores de glutamato de tipo NMDA, que explicaría el amplio abanico de síntomas que caracterizan a este trastorno.

GANGLIOS BASALES Intervienen en el movimiento, las emociones y la integración de la información sensorial. Se cree que su funcionamiento anormal contribuye a la paranoia y a las alucinaciones. (Los fármacos antipsicóticos tradicionales producen un bloqueo excesivo de los receptores de dopamina en los ganglios basales, lo que comporta efectos secundarios motores.)

SISTEMA AUDITIVO Capacita para oír y comprender el lenguaje. En la esquizofrenia, la hiperactividad del área del lenguaje (área de Wernicke) genera alucinaciones acústicas: los pensamientos se perciben como voces que proceden del exterior.

LOBULO OCCIPITAL Se ocupa del procesamiento de la información visual. Si bien las personas con esquizofrenia raramente padecen alucinaciones visuales completas, la alteración de esa estructura dificulta la interpretación de imágenes complejas, el reconocimiento de movimientos y la lectura de emociones en el rostro de otras personas.

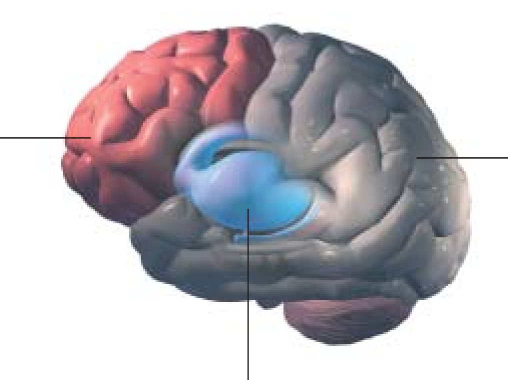
LOBULO FRONTAL Resulta crítico para la resolución de problemas, la intuición y el razonamiento. Su perturbación conduce a una dificultad para planificar acciones y organizar pensamientos.

HIPOCAMPO Media el aprendizaje y la formación de recuerdos: funciones entrelazadas que se alteran en la esquizofrenia.

SISTEMA LIMBICO Interviene en la emoción. Su alteración podría contribuir a la agitación que suele acompañar a la esquizofrenia.

NEUROTRANSMISORES DISTINTOS, RESULTADOS IDENTICOS

SE HA PROPUESTO que un exceso de dopamina podría provocar síntomas relacionados con la actividad de los ganglios basales. Un déficit de la misma generaría síntomas asociados con la corteza frontal. Sin embargo, una carencia de glutamato podría producir los mismos síntomas.



EN EL RESTO DE LA CORTEZA prevalece el glutamato, mientras que la dopamina escasea.

EN LA CORTEZA FRONTAL, donde la dopamina insta la excitación celular (al actuar sobre los receptores D1), las señales estimuladoras de glutamato amplifican las de la dopamina. Por consiguiente, la caída de glutamato mermaría la actividad neuronal, lo mismo que si hubiera una baja concentración de dopamina.

EN LOS GANGLIOS BASALES, donde la dopamina inhibe la excitación celular (al actuar sobre los receptores D2), las señales estimuladoras de glutamato se oponen a las de la dopamina. En consecuencia, la escasez de glutamato aumentaría la inhibición, lo mismo que si hubiera un exceso de dopamina.

ALFRED T. KAMAJIAN

profundas. En concreto, cuando se aplica una dosis de choque de cetamina, a los individuos normales les cuesta razonar, asimilar información nueva, cambiar de estrategia o ubicar la información en la memoria a corto plazo. Sus movimientos se hacen más lentos y el habla premiosa, exactamente como ocurre en la esquizofrenia. Personas a las que se administra PCP o cetamina también se retraen y a veces incluso enmudecen. Si hablan, lo hacen de manera tangencial y cortante. La fenciclidina y la cetamina no suelen provocar alucinaciones de tipo esquizofrénico en los voluntarios del ensayo, aunque las exacerban en los pacientes reales.

La capacidad de la fenciclidina y la cetamina para inducir un amplio espectro de síntomas semejantes a los de la esquizofrenia abona la tesis de que estas sustancias promueven alteraciones que se producen en el cerebro del enfermo. A escala molecular, los fármacos alteran el funcionamiento de los sistemas de señalización cerebral que se apoyan en el glutamato, el principal neurotransmisor excitatorio del encéfalo. En concreto, bloquean la acción del receptor de glutamato de tipo NMDA, que desempeña una función crítica en el desarrollo del cerebro, el aprendizaje, la memoria y el procesamiento neuronal. Este receptor participa también en la regulación de la liberación de dopamina. Su bloqueo produce las mismas alteraciones en la función de la dopamina que las observadas en la esquizofrenia. Por tanto, la disfunción del receptor NMDA explica por sí misma los síntomas negativos y cognitivos, del mismo modo que los desequilibrios de dopamina justifican los síntomas positivos.

Además de reforzar las conexiones entre neuronas, los receptores NMDA amplifican las señales neuronales (a la manera de los transistores de los viejos aparatos de radio, que transformaban las débiles ondas de radio en sonidos intensos). Al hacerlo de forma selectiva, estos receptores permiten que el cerebro responda ante algunos mensajes clave e ignore otros. Así, facilitan la concentración y la atención. En general, percibimos con más intensidad los sonidos extraños que los familiares. Nos llaman más la atención los que nos llegan del exterior que los que emitimos nosotros mismos cuando hablamos. Pero los pacientes con esquizofrenia no reaccionan de ese modo. Diríase que, en ellos, los circuitos cerebrales que dependen de los receptores NMDA se hallan átonos.

Si la actividad mermada de los receptores NMDA desencadena los síntomas de la esquizofrenia, ¿cuál es la causa de tal caída? La respuesta sigue sin conocerse. Algunos estudios indican que las personas con esquizofrenia tienen un número menor de receptores NMDA, aunque los genes que cifran tales receptores no parecen mutados. Pero si los receptores permanecen inalterados y en cantidad adecuada, tal vez el problema radique en la liberación del glutamato o en la acumulación de compuestos que obstruyan la actividad del NMDA.

Hay pruebas que respaldan cada una de esas ideas. Los estudios *post mortem* de pacientes con esquizofrenia revelan no sólo niveles inferiores de glutamato, sino también niveles superiores de NAAG, de ácido kinurénico y del aminoácido homocisteína, tres compuestos que perturban la actividad de los receptores NMDA. La manera en que los síntomas esquizofrénicos aparecen y evolucionan sugiere que las sustancias que alteran los receptores NMDA se acumulan en el cerebro de estos pacientes. Con todo, no debemos precipitarnos. Podría bien ser que los mecanismos de atenuación de los receptores NMDA fueran totalmente distintos a los que aquí se proponen.

Fármacos en desarrollo

A salvo de otra indicación, los compuestos que señalamos se encuentran en las primeras fases del ensayo en humanos. Los responsables del desarrollo o fabricantes aparecen en paréntesis.

Estimuladores de los receptores del glutamato de tipo NMDA. Su objetivo es compensar los déficits de señalización que al parecer contribuyen a diversos síntomas de esquizofrenia.
Ejemplos: Glicina (Medifoods), D-serina (Glytech). Si bien ambas se comercializan como sustancias naturales, se está evaluando su eficacia en el tratamiento de la esquizofrenia.

Estimuladores de los receptores de glutamato de tipo AMPA. También denominados ampaquinas, podrían mejorar algunos aspectos de la memoria y la cognición en personas con esquizofrenia.
Ejemplo: CX516 (Cortex Pharmaceuticals).

Moduladores de receptores de glutamato metabotrópicos. Regulan la liberación de glutamato y potencialmente restauran el equilibrio entre la actividad de los receptores de tipo NMDA y AMPA.
Ejemplo: LY354740 (Eli Lilly)

Inhibidores del transporte de glicina. Reducen la remoción de glicina en las sinapsis, lo que debería aumentar la señalización mediada por receptores de tipo NMDA.
Ejemplo: GlyT-1 (NPS Pharmaceuticals y Janssen Pharmaceutica).

Estimuladores de los receptores nicotínicos alfa 7. De forma indirecta estimulan los receptores NMDA del cerebro. Se trata de los mismos receptores que activa la nicotina de los cigarrillos (muchos enfermos de esquizofrenia son fumadores severos; probablemente porque la nicotina, al actuar sobre los receptores alfa 7, les ayuda a concentrarse).
Ejemplo: DMXB-A (Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado).

Receptores D1 de dopamina. Se están desarrollando principalmente para la enfermedad de Parkinson. Han superado las pruebas de seguridad iniciales. Su posible capacidad para corregir las deficiencias de dopamina en la esquizofrenia todavía no se ha ensayado clínicamente.
Ejemplo: ABT-431 (Abbot Pharmaceuticals).

Nuevos tratamientos

Independientemente de cuál sea la causa de la alteración de la función señalizadora del receptor NMDA, la comprensión actual de la esquizofrenia, avalada en ensayos provisionales con pacientes, ofrece esperanzas de tratamientos farmacológicos eficaces. Esta idea se apoya en estudios que muestran que la clozapina, uno de los medicamentos más resolutivos contra la esquizofrenia, anula los efectos que la PCP induce sobre el comportamiento en animales, resultado que no se obtenía con los antipsicóticos tradicionales. Más aún, los ensayos a corto plazo con sustancias que estimulan los receptores NMDA han producido resultados alentadores. Han respaldado la hipótesis del glutamato y han dado paso a pruebas clínicas a largo plazo. Si se demuestra su eficacia, dichos activadores de los receptores NMDA se convertirán en la primera clase de fármacos desarrollados específicamente para combatir los síntomas negativos y cognitivos de este trastorno mental.

En uno de los estudios acometidos por los autores de este artículo, se administraron los aminoácidos glicina y D-serina a pacientes que recibían una medicación estándar. Estos experimentaron un descenso de un 30 a un 40 por ciento de la sintomatología cognitiva y negativa, junto con cierta mejoría de la positiva. La administración de D-cicloserina, un medicamento indicado en el tratamiento de la tuberculosis que interacciona con el receptor NMDA, produjo resultados semejantes. Basándose en estos hallazgos, el Instituto Nacional de la Salud Mental de EE.UU. ha organizado pruebas multicéntricas en cuatro hospitales para determinar la eficacia de la D-cicloserina y la glicina en el tratamiento de la esquizofrenia. Ensayos con D-serina (realizados en otros lugares, puesto que su uso todavía no se ha aprobado en los EE.UU.) también están ofreciendo resultados alentadores. Asimismo, dichas sustancias han demostrado su valía cuando se administran junto con antipsicóticos atípicos de nueva generación. Todo parece indicar que vamos por buen camino. Se empieza a perfilar el desarrollo de una terapia que controle a la vez los tres tipos de síntomas principales.

No obstante, ninguno de los agentes ensayados hasta la fecha cumple con los requisitos de comercialización. Las dosis necesarias, por ejemplo, podrían ser demasiado elevadas. Por ello, se están estudiando vías alternativas. Moléculas que ralentizan la remoción de la glicina en la sinapsis —inhibidoras del transporte de glicina— podrían conseguir que el aminoácido persistiera adherido un tiempo mayor de lo habitual, con el incremento consiguiente de la estimulación de los receptores NMDA. Sustancias activadoras de los receptores de glutamato de tipo AMPA que operan en concierto con los receptores NMDA también se están investigando. Por último, se han propuesto compuestos que evitan la degradación de la glicina o la D-serina en el cerebro.

Estrategias alternativas

Para mejorar la vida de las personas con esquizofrenia se están explorando también, más allá de los sistemas de señalización cerebral, otros factores que podrían paliar los síntomas o incluso proteger contra la enfermedad. En este sentido, la aplicación de chips de genes ha permitido estudiar el tejido cerebral de personas que han fallecido cotejándolo con la actividad de decenas de millares de genes en individuos con o sin esquizofrenia. Se ha visto que muchos genes importantes para la sinapsis revelan una actividad menor en los pacientes esquizofrénicos; no obstante, se desconoce el significado exacto de estos hallazgos para el desarrollo de la afección y su posible tratamiento.

La investigación reciente sobre las bases genéticas de la esquizofrenia ha aportado datos de sugerente interés. El problema de la heredabilidad del trastorno ha sido una cuestión controvertida desde hace tiempo. Si la enfermedad estuviera dictada exclusivamente por los genes, el gemelo idéntico de una persona con esquizofrenia padecería también la afección, pues los dos

Un elevado coste social

LA ESQUIZOFRENIA pasa factura a la sociedad. Puesto que tiende a aparecer en el tránsito de joven a adulto, para persistir, los gastos médicos y sueldos perdidos que genera representan una pesada carga económica.

El tratamiento farmacológico combinado con un fuerte apoyo social ayuda a algunos individuos a llevar una vida relativamente productiva y satisfactoria. Pero éste no es el caso de la mayoría. Conservan su empleo menos de un tercio de los pacientes (y la mitad de éstos requieren atención constante). Los varones, que tienden a presentar los síntomas antes que las mujeres, no se suelen casar; las mujeres que contraen matrimonio acostumbran fracasar. Aislados y sin empleo, los individuos con esquizofrenia predominan entre los que duermen en la calle.

Las personas con esta enfermedad tienen una probabilidad elevada de caer en la drogadicción; más del 60 por ciento fuma; la mitad abusan del alcohol, de la marihuana o la cocaína. Semejantes hábitos terminan por provocar una actitud negativa hacia la perseverancia en el tratamiento. Si se abandona la medicación, los síntomas psicóticos se exacerban y aumenta la propensión a la violencia. La falta de vivienda y la drogadicción se combinan de tal modo, que muchos pacientes con esquizofrenia acaban en prisión, donde a menudo no disponen del tratamiento adecuado.

Las cifras sombrías no acaban aquí: aproximadamente el 10 por ciento de estos enfermos se suicidan, habitualmente durante las primeras etapas de la enfermedad (proporción mayor que entre los pacientes con depresión profunda). Pero una luz de esperanza ilumina el camino: recientemente se ha visto que la clozapina, un antipsicótico atípico introducido en 1989, reduce el riesgo de suicidio y drogadicción.



COOP PHOTO ART COLLECTIVE

3. LOS OBJETOS tienen a menudo significados ocultos para las personas con esquizofrenia. Tal y como se recrea en la pared de la imagen, pueden acaparar recortes de periódicos, fotografías u otros objetos inútiles para la mayoría.

poseen la misma constitución genómica. Pero en realidad, el gemelo idéntico de un paciente con esquizofrenia tiene un riesgo del 50 por ciento de desarrollar la enfermedad. Además, el trastorno afecta sólo alrededor de un 10 por ciento de los familiares de primer grado del paciente (padres, hijos o hermanos), si bien comparten con él una media del 50 por ciento de los genes.

Ante semejante disparidad cabe inferir que la herencia genética predispone a la esquizofrenia, pero son los factores ambientales los que terminan por provocar en la persona susceptible la enfermedad, o quizá protegerla de la misma. Las infecciones prenatales, la malnutrición, las complicaciones del parto y las lesiones cerebrales constituyen algunos de los factores que probablemente promueven el desarrollo de la esquizofrenia en individuos genéticamente predispuestos.

A lo largo de los últimos años se han identificado varios genes que aumentarían el riesgo de esquizofrenia. Uno de ellos codifica la catecol-O-metiltransferasa, enzima implicada en el metabolismo de la dopamina en la corteza prefrontal. Los que codifican las proteínas disbindina y neurregulina parecen afectar a la cuantía de receptores NMDA en el cerebro. El gen de la D-aminoácido-oxidasa, una enzima implicada en la degradación de la D-serina, puede tomar múltiples formas; la más activa quintuplica el riesgo de esquizofrenia. Otros genes podrían dar lugar a rasgos asociados con la esquizofrenia, pero no inducir la enfermedad propiamente dicha.

Puesto que cada gen implicado en la esquizofrenia sólo es responsable de un pequeño aumento del riesgo, la investigación genética habrá de abarcar una población muy extensa de afectados para detectar un solo efecto. Por otro lado, la existencia de múltiples genes que predisponen a la esquizofrenia puede explicar la variabilidad de síntomas de unos individuos a otros: unos muestran las alteraciones asociadas a las vías de la dopamina y otros las de otros neurotransmisores.

Por último, se buscan también claves indicativas en las imágenes obtenidas de cerebros activos y en la comparación de cerebros de personas muertas. En general, los individuos con esquizofrenia tienen cerebros menores que los que no padecen esta enfermedad, del mismo sexo y edad parecida. Se creía que los déficits neuronales se restringían a determinadas áreas (lóbulo frontal), pero se han descubierto también anomalías semejantes en muchas otras regiones. Los enfermos de esquizofrenia muestran respuestas cerebrales anormales cuando realizan tareas que activan no sólo los lóbulos frontales sino también las que controlan la audición y la visión.

No existe, pues, el área cerebral de la esquizofrenia. Quizá sea éste el principal avance de la investigación sobre el tema. De la misma forma que el comportamiento normal requiere la coordinación de todo el cerebro, la esquizofrenia debe concebirse como una subversión general de las interacciones, a veces sutiles, que se producen entre regiones cerebrales y en el seno de cada una.

Tal variedad de síntomas induce a pensar en un abanico muy amplio de causas. Lo que hoy describimos como esquizofrenia puede tratarse de un grupo de afecciones diferentes con síntomas semejantes y coincidentes. Sin embargo, conforme se van iluminando las bases neurológicas de la enfermedad, deberían poderse desarrollar tratamientos que ajustaran la señalización del cerebro a la medida de cada individuo.

Los autores

Daniel C. Javitt y **Joseph T. Coyle** vienen estudiando la esquizofrenia desde hace muchos años. Javitt, profesor de psiquiatría en la facultad de medicina de la Universidad de Nueva York, dirige el programa de neurociencia y esquizofrenia en el Instituto Nathan Kline de Investigaciones Psiquiátricas en Orangeburg. Coyle ocupa la cátedra Eben S. Draper de psiquiatría y neurociencias en la facultad de medicina de Harvard.

Bibliografía complementaria

RECENT ADVANCES IN THE PHENCYCLIDINE MODEL OF SCHIZOPHRENIA. D. C. Javitt y S. R. Zukin en *American Journal of Psychiatry*, vol. 148, n.º 10, págs. 1301-1308; octubre de 1991.

EFFICACY OF HIGH-DOSE GLYCINE IN THE TREATMENT OF ENDURING NEGATIVE SYMPTOMS OF SCHIZOPHRENIA. U. Heresco-Levy, D. C. Javitt, M. Ermilov, C. Mordel, G. Silipo y M. Lichtenstein en *Archives of General Psychiatry*, vol. 56, n.º 1, págs. 29-36; enero de 1999.

A BEAUTIFUL MIND: THE LIFE OF MATHEMATICAL GENIUS AND NOBEL LAUREATE JOHN NASH. Sylvia Nasar. Touchstone Books, 2001.

THE EMERGING ROLE OF GLUTAMATE IN THE PATHOPHYSIOLOGY AND TREATMENT OF SCHIZOPHRENIA. D. C. Goff y J. T. Coyle en *American Journal of Psychiatry*, vol. 158, n.º 9, págs. 1367-1377; septiembre de 2001.

REVOLUTION #9. Dirigido por Tim McCann. Wellspring Media, 2001. VHS y DVD, 2003.

Aculturación de ida y vuelta

Iconografía novohispana en España

Desde que se instituyó el virreinato de la Nueva España, éste se convirtió en un destino atractivo para muchos españoles. Las órdenes religiosas se ocupaban de la difusión cultural, lo que junto con la pervivencia de creencias prehispánicas dio lugar a un interesante clima de sincretismo religioso. A las múltiples etnias de origen mesoamericano se unieron europeos y esclavos, configurando un enriquecedor mestizaje racial.

La vida artística comenzó a desarrollarse gracias a los indios, que eran instruidos por frailes españoles en las escuelas conventuales, y a los pintores que fueron llegando de Europa. Nueva España pronto congregó un gran número de artistas, como lo demuestra la creación de los distintos gremios, trasunto de los españoles.

La fuente de inspiración más recurrida en los primeros tiempos fueron los grabados, estampas y pinturas de origen europeo, que los artistas copiaban respetando rigurosamente las iconografías aceptadas por la Iglesia. Las pinturas europeas que se remitían a América eran tratadas como simples productos en los que se valoraba más la cantidad que la calidad. En su mayoría de carácter devocional, en ellas imperaba más la función didáctica que la estética.

La capital del mercado artístico con las Indias se hallaba en Sevilla. Allí acudían artistas de otras ciudades e incluso se crearon compañías formadas por pintores y comerciantes. A comienzos del siglo XVII, casi todos los maestros que trabajaban en la metrópoli hispalense negociaron con América. Artistas de gran renombre como Francisco Zurbarán, Bartolomé Esteban Murillo o Juan de Valdés Leal exportaron pinturas a la Nueva España.

Las imágenes se convirtieron en eficaces instrumentos al servicio de la Iglesia y el Estado. Debían ofrecer un lenguaje integrador y de fácil comprensión. Los evangelizadores incluso trataron de asimilar al cristianismo ancestrales deidades prehispánicas que ya gozaban de aceptación. Los muros conventuales se llenaron de ciclos narrativos con un sentido esencialmente adoctrinador. Las imágenes más re-



1. Virgen de Guadalupe. Anónimo novohispano. Siglo XVII. Oleo sobre lienzo. Sacristía de la iglesia del convento de las Comendadoras de Santiago de Granada



2. Virgen de Guadalupe. Anónimo novohispano. Siglo XVII. Oleo sobre lienzo. Zona de clausura del convento del Espíritu Santo de Sevilla

presentadas eran las difundidas por la Contrarreforma, movimiento católico impulsado por el Concilio de Trento frente a las ideas del Protestantismo. Dominaban los temas marianos, los cristológicos, en particular los relativos a la Pasión, y ciertos pasajes bíblicos como la Adoración de los Reyes. También abundaban las iconografías de los santos.

Uno de los aspectos más interesantes fue el surgimiento de una serie de devociones locales que simbolizaban valores nativos como la Virgen de Ocotlán, el Cristo de Chalma o San Miguel del Milagro. Pero el culto que constituyó un auténtico lazo de unión entre las distintas razas y clases sociales fue el de la Virgen de Guadalupe. La advocación extremeña le cedió el nombre y parte de su prestigio. Sin embargo, la de México tiene orígenes propios bien conocidos.

Una antigua leyenda relata el portento mariano ocurrido en el año 1531 en el monte Tepeyac. La Virgen se le apareció a un indio llamado Juan Diego, solicitándole que acudiera al obispo fray Juan de Zumárraga para pedirle la construcción de una capilla en su honor y dejando como testimonio su imagen milagrosamente impresa en el ayate (túnica) del indio. Enseguida aparecieron numerosos escritos destinados a respaldar la veracidad de este acontecimiento.

En la iconografía reside la principal diferencia entre la Virgen mexicana y la española. Mientras que la Virgen de Guadalupe extremeña es una imagen románica, la mexicana guarda una estrecha relación con el tipo de la Inmaculada Concepción. En sus representaciones pictóricas se mantuvo invariable a lo largo de los siglos. Cambiarían sólo los elementos que la acompañaban. Su esquema compositivo quedó definido según la figura estampada en el ayate de Juan Diego: sin niño, con corona, rodeada de rayos solares, entre nubes, y con la piel morena como la de los indios, su rasgo más emblemático. La pintura guadalupana más antigua e innovadora que se conoce la realizó Baltasar de Echave Orio en 1606.

El modelo más popular incluía en los ángulos del cuadro medallones con las escenas de las apariciones de la Virgen y el milagro. Un elemento decorativo que surgió en el siglo XVII fue el enmarcamiento de rosas. Posteriormente se tendió a delimitar un espacio a los pies de la Virgen en el que se incluía una quinta escena, por lo general dedicada a Tepeyac. A veces se acompañaba de algún tema bíblico con el objetivo de reclamar el acontecimiento guadalupano como exclusivo de la Nueva España. Al siglo XVIII corresponden las alegorías más ricas.

Durante los siglos XVII y XVIII, multitud de pinturas novohispanas arribaron a los puertos españoles para ingresar en colecciones privadas. Entre los personajes que desempeñaron esta actividad podemos señalar el gran número de funcionarios españoles que se habían establecido en el Virreinato. Además del valor religioso, y en algunas de



3. Virgen de Guadalupe. Anónimo novohispano. 1748. Oleo sobre lienzo. Se encuentra en la sacristía de la iglesia de San José de Cádiz



4. Virgen de Guadalupe. Anónimo novohispano. Finales del siglo XVII. Oleo sobre madera. Tesoro de la catedral de Santiago de Compostela (La Coruña)

ellas artístico, había que añadirles un componente de exotismo. Uno de los sectores que más propiciaron la llegada de pinturas fue el eclesiástico. También los “indianos”, españoles que después de pasar una larga temporada en las Indias regresaban a su tierra natal enriquecidos y desempeñaban actividades de mecenazgo artístico. En ocasiones, una placa junto al cuadro indica el nombre del donante. En los Inventarios de Bienes de Difuntos o cartas personales conservados en el Archivo de Indias de Sevilla se recogen datos de estas características y se constata la devoción profesada por estos personajes a algunas advocaciones novohispanas.

La iconografía de la Virgen de Guadalupe cuenta con representaciones a lo largo de casi toda la geografía española. Desde el punto de vista iconográfico, no existe gran variedad de modelos. Podemos distinguir tres clases principales: *a*) la “fiel copia del original”, que se caracteriza por la ausencia de cualquier elemento decorativo; *b*) la que incluye en los ángulos las tres escenas de las apariciones de la Virgen y el milagro, habitualmente acompañadas de rosas, angelitos o ambos motivos (a veces también presenta una escena en la parte central inferior dedicada al paisaje del Tepeyac); y *c*) las “iconografías alternativas”, que no se ciñen al modelo tradicional.

Junto a éstas, en España se conservan también pinturas de otras temáticas novohispanas. Entre los temas marianos podemos citar algunas advocaciones de origen español como la Virgen de los Remedios o la Virgen de Valvanera, que se representaron en un contexto indiano. De los temas cristológicos se recurrió esencialmente al de la Santísima Trinidad, que adoptó el modelo de la “Trinidad antropomorfa”, consistente en representar a Dios Padre, Dios Hijo y el Espíritu Santo a través de tres hombres jóvenes casi idénticos. Además, encontramos temáticas típicamente novohispanas como la del Cristo de la Encina, de la que se conservan varias muestras en Extremadura. Una de las más ricas iconografías hagiográficas fue la de Santa Rosa de Lima, que los criollos mexicanos prácticamente adoptaron como propia, o la de la religiosa criolla sor Juana Inés de la Cruz, la figura femenina más representada después de la Virgen de Guadalupe.

La mayoría de los primeros artistas que trabajaron en el virreinato procedían de España; muchos estaban vinculados a importantes personalidades. Entre ellos podemos mencionar a Baltasar de Echave Orio, Alonso Vázquez, Andrés de Concha y Sebastián López de Arteaga. Luis Juárez ostenta el honor de ser el primer representante de la escuela novohispana. Juan Correa fue el artista más importante del siglo XVII en el virreinato. También gozaron de gran prestigio Cristóbal de Villalpando, Manuel de Arellano o los hermanos Juan y Nicolás Rodríguez Juárez. Quizás el ejemplo que mejor refleja las relaciones entre la Iglesia y los artistas nos lo ofrezca Miguel Cabrera, el pintor más emblemático del siglo XVIII y tal vez de toda la pintura novohispana. Junto con José de Ibarra presidió la primera academia de pintura mexicana. Francisco Antonio Vallejo, Juan Patricio Morlete Ruiz o José de Alcíbar figuraron también en la galería de celebridades.

El tema guadalupano se halló omnipresente en la producción de casi todos ellos. Juan Correa está considerado el más importante pincel guadalupano del siglo XVII. Realizó un calco del original, gracias al cual se convirtió en el artista que con mayor fidelidad la representó. El lienzo de la iglesia de San Nicolás de Bari de Sevilla constituye, para muchos, la mejor y más novedosa de sus composiciones guadalupanas. En el XVIII Miguel Cabrera recoge su testigo. Intervino junto a prestigiosos artistas en el estudio del lienzo original y publicó sus conclusiones en *Maravilla americana y conjunto de raras maravillas*...

La presencia de estas obras en la mayoría de los casos responde a motivos concretos: la cercanía al mar, la actividad religiosa, la participación en el descubrimiento y la colonización del Nuevo Mundo, o los legados indianos, a menudo relacionados con la emigración ultramarina.

Andalucía y América estuvieron vinculadas desde los primeros momentos del Descubrimiento, pues la mayor parte de los descubridores y primeros colonizadores eran andaluces. El caso de Andalucía Occidental difiere bastante del de Andalucía Oriental. Tanto Cádiz como Sevilla desempeñaron un importante papel en las relaciones comerciales con América, por lo que son actualmente depositarias del mayor volumen de pintura novohispana que se conserva en España.

De Sevilla se exportaron artistas, temas, estilos y técnicas al Nuevo Mundo. Muchos sevillanos ilustres trajeron copias del retrato guadalupano. Además, tanto en Cádiz como en Sevilla existieron talleres de copias de la Guadalupana. Muchos de los lienzos novohispanos localizados en Sevilla y su provincia se encuentran en iglesias y conventos.

Aunque en menor medida, Cádiz también constituyó uno de los principales enclaves portuarios y participó activamente en el tráfico americano. Allí se instituyó el Juzgado de Indias y, desde el siglo XVIII, la Casa de la Contratación, que hasta entonces había tenido su sede en Sevilla. Muchos gaditanos mantuvieron vínculos con América, como revelan las múltiples instituciones religiosas que albergan obras novohispanas.

Merced a su carácter portuario, Huelva estuvo vinculada con las Indias desde la época del Descubrimiento. En su provincia existen lugares de conocidas connotaciones americanistas como Palos de Moguer y el monasterio de Santa María de la Rábida. En el caso de Málaga, de su puerto partieron muchos productos que embarcaron en Sevilla hacia las Indias. Ilustres malagueños desempeñaron importantes cargos políticos en el virreinato y muchos de ellos trajeron pinturas guadalupanas. Jaén también estuvo ligada a la empresa americana desde los primeros momentos. En la iglesia de San Ildefonso de esta ciudad se encuentra un lienzo guadalupano que, para algunos historiadores, constituye la primera reproducción de la Virgen de Guadalupe. Las conexiones de Granada con América fueron más significativas.

Señalaremos, a modo de conclusión, que el número de obras con-

servadas en España, así como la calidad de las mismas, son considerables. Estas pinturas constituyen un fiel reflejo de las principales advocaciones virreinales y dan fe de un proceso de ida y vuelta de conceptos culturales que tuvo lugar a lo largo de tres siglos.

PATRICIA BAREA AZCÓN
doctora en historia del arte
Granada

Contaminación

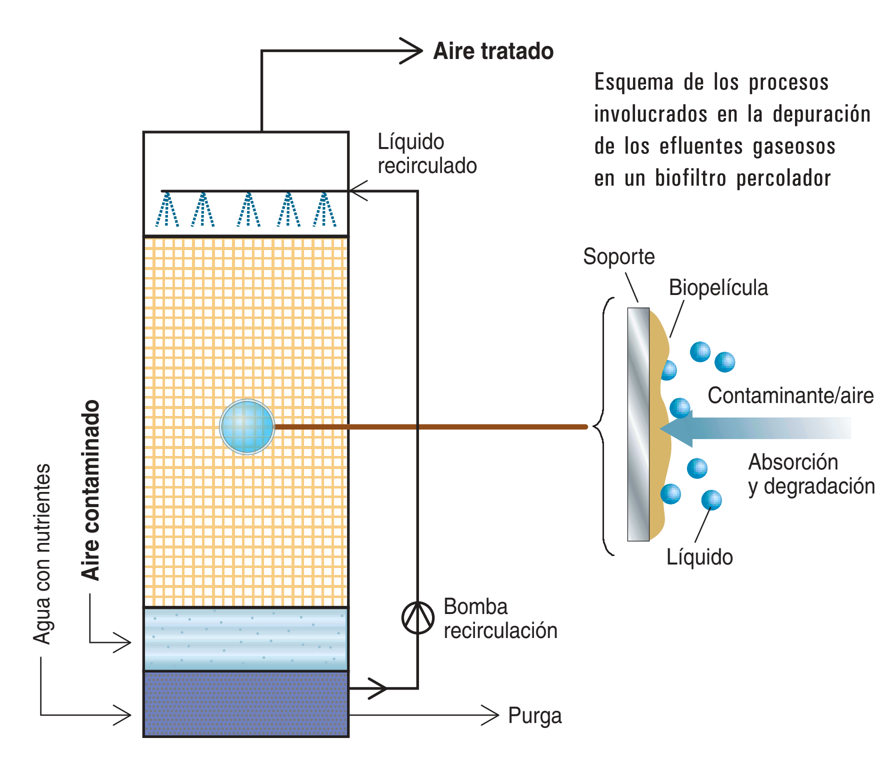
Depuración biológica de gases

La sociedad actual genera una gran cantidad de residuos. Si queremos sostener el entorno en el que vivimos, debemos minimizar su generación y en último extremo tratar tal contaminación, puesto que la naturaleza es incapaz de recuperarse por sus propios medios. Con tal fin, históricamente se ha recurrido a agentes físicos y químicos capaces de degradar los contaminantes, pero esta tendencia está cambiando. Las depuradoras de aguas residuales, por ejemplo, utilizaban productos químicos como precipitantes y coagulantes. Ahora están en desuso y se han substituido por tratamientos biológicos. Igualmente, durante años se han desarrollado diferentes técnicas para el tratamiento de efluentes gaseosos mediante sistemas físico-químicos, pero éstos acarrean un coste de operación elevado, así como una eficacia limitada. Hoy en día, la absorción reactiva y la adsorción constituyen las técnicas más utilizadas en la industria para tratar emisiones gaseosas puntuales de fuentes estacionarias.

La depuración biológica se aplica al tratamiento de compuestos contenidos en efluentes de fuentes industriales estacionarias (excepto la emisión de partículas y otros gases de combustión, que deben tratarse mediante sistemas físico-químicos puesto que los biológicos no son efectivos por ahora). Los biorreactores utilizan la actividad metabólica de microorganismos para tratar contaminantes gaseosos, que son fuente de energía y materia esenciales para el crecimiento microbiano. Antes de ser degradados biológicamente, los contaminantes se transfieren de la fase gas a una fase líquida, a una biopelícula o a ambas. La biopelícula se forma sobre la superficie de un soporte orgánico o inerte, retenido en el interior del biorreactor. Los contaminantes de interés deben ser en cierto grado biodegradables, no tóxicos y mínimamente solubles. El tratamiento resulta efectivo y económico cuando el contaminante se encuentra en concentraciones bajas (inferiores a 5 mg/l) y el caudal de aire es grande (hasta 500.000 metros cúbicos por hora). También se favorece si el contaminante tiene un peso molecular bajo y es altamente soluble.

Una de las aplicaciones en las que la depuración biológica ha demostrado robustez y una viabilidad económica superior a la de los procesos físico-químicos es el tratamiento de gases contaminados con sulfuro de hidrógeno. Este compuesto se caracteriza por un olor similar al de huevos podridos y generalmente se asocia a la industria del tratamiento de residuos, en particular a las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Se genera en los colectores que se dirigen a la EDAR, donde los sulfatos presentes en las aguas residuales se reducen por la presencia de microorganismos sulfato-reductores y en condiciones anaerobias.

La depuración biológica de gases ha experimentado un claro progreso, pero todavía no han conseguido alcanzar la competitividad de los procesos clásicos. Su principal limitación radica en el volumen de los biorreactores, mucho mayor que el requerido en tratamientos clásicos como las torres de absorción, aunque muchos de los biofiltros desarrollados en industrias se han sobredimensionado excesivamente para asegurar la completa eliminación de los contaminantes. Sin embargo, tal desventaja se está reduciendo progresivamente mediante el desarrollo de diseños alternativos y la utilización de nuevos materiales de soporte que permiten reducir el tiempo de contacto del gas. Para optimizar el diseño, coste y operación de los biorreactores, necesitamos ahondar en el conocimiento de los fenómenos que ocurren en su interior.



Esquema de los procesos involucrados en la depuración de los efluentes gaseosos en un biofiltro percolador

DAVID GABRIEL BUGUÑA
Departamento de Ingeniería Química
Universidad Autónoma de Barcelona

Texto y fotografías: Jorge Guillén

El fondo del mar ondulado

Nos imaginamos los fondos marinos como lugares tranquilos, donde dominan la quietud y la calma, ocasionalmente rotas por la llegada de alguna partícula. Aunque esa idea no se corresponde con la realidad, resulta especialmente errónea en la zona litoral. Con una frecuencia de segundos, el fondo sufre el zarandeo producido por el movimiento de vaivén del oleaje, con fuerzas equiparables con las ejercidas por el agua de un río durante su crecida. En razón de ello, los fondos de arena de nuestro litoral aparecen surcados por una serie de elementos morfológicos de escalas y disposición variables, creando las así llamadas estructuras sedimentarias de fondo.

Cuando se trata de una sucesión de crestas y surcos, parecidos a las dunas, aunque con unas dimensiones de altura y distancia entre crestas inferiores a 0,1 y 1 m respectivamente, reciben el nombre de ondulaciones ("ripples"). Se originan éstas cuando la energía procedente de olas y corrientes marinas que alcanza el fondo mueve los granos de arena. Este movimiento del sedimento se traduce en una estructura morfológica bien organizada, en la que se mantiene constante la altura de la ondulación y la distancia entre las crestas en amplias zonas. El tamaño de las ondulaciones aumenta con la energía motriz hasta llegar a un límite, en condiciones de temporal, en el que la energía es tan elevada, que se destruyen las ondulaciones y se genera un fondo plano.

Otro de los elementos morfológicos comunes de nuestro litoral son los "bancos", barras de arena que surcan nuestras playas. Aunque los hay de muy diferentes tamaños, las barras pueden alcanzar varios metros de altura y algunos kilómetros de longitud, disponiéndose de forma paralela a la playa. En costas con poca pendiente, solemos encontrar un primer banco muy próximo a la playa y otro más alejado. Estas barras, elementos muy dinámicos, presentan rápidos desplazamientos durante los temporales. El origen de las barras de arena guarda relación con la disponibilidad de sedimento y un clima de oleaje determinado en la costa. En algunos lugares, el ciclo de vida de estas barras (desde su formación hasta su desaparición, sustituidas por una nueva barra) puede ser superior a los 15 años.

1. Las características de las ondulaciones pueden depender, asimismo, del tipo de comunidades bentónicas asentadas en el substrato. Las comunidades con individuos sésiles favorecen el predominio de determinadas longitudes de onda en el campo de ondulaciones. Por el contrario, las comunidades con individuos móviles, como la de ofiuras, pueden destruir las ondulaciones al poco de su formación.



2. Las barras de arena constituyen una excelente defensa de las playas frente a los temporales. La menor profundidad de la cresta de la barra provoca que la ola que se aproxima a la costa rompa y pierda buena parte de su energía antes de alcanzar la playa.



3. La presencia de ondulaciones en el fondo marino es un indicador de existencia de una dinámica sedimentaria activa, capaz de transportar el sedimento. La forma simétrica de las ondulaciones obedece a elementos morfológicos generados por el movimiento bidireccional del oleaje. Las corrientes, especialmente las asociadas a la marea, también pueden crear ondulaciones, aunque en este caso con morfología asimétrica. (Foto Josep-Maria Gili)

4. Las dunas son equivalentes a las ondulaciones, aunque de mayor tamaño. La fotografía ilustra un campo de dunas a 32 m de profundidad con un sedimento constituido por arenas y gravas. En estos ambientes, sólo los grandes temporales remueven el sedimento; las dunas permanecen inactivas durante la mayor parte del tiempo. (Foto: Claudio Lo Iacono)

Sistemas de identificación por radiofrecuencia

Ya habituales en sistemas de seguridad y cabinas telefónicas, las etiquetas de identificación por radiofrecuencia se conjugan con unidades lectoras para realizar numerosos procesos hasta ahora confiados al esfuerzo humano

Roy Want

Hace trece años, el ya fallecido Mark Weiser explicaba en *Investigación y Ciencia* la audaz idea de la "computación ubicua": minúsculos ordenadores se integrarían en los objetos de uso diario y responderían, mediante conexiones inalámbricas, a nuestra presencia y necesidades sin que interviniésemos nosotros. La red de elementos fijos y móviles así formada nos serviría de un modo automático y sería tan invisible, que sólo percibiríamos sus efectos. Podríamos concentrarnos en el propio trabajo, liberados de que se nos exija interacción alguna con los instrumentos informáticos, al contrario de lo que sucede hoy con los clásicos ordenadores personales.

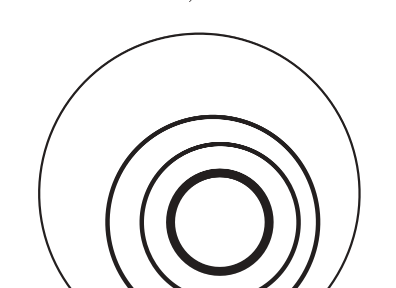
Las unidades lectoras instaladas en lugares estratégicos del dormitorio, el marco de la puerta del baño, la escalera y el frigorífico detectarían los datos de identificación emitidos por microchips cosidos en la ropa o adheridos al empaquetado de los alimentos, y los remitirían a un ordenador doméstico, que actuaría en consecuencia: en cuanto supiese que el usuario se ha levantado de la cama, encendería la cafetera; cuando entrase en el baño abriría la ducha a la temperatura preferida; en el momento en que saliese hacia la cocina empezaría a calentarse el pan en la tostadora; al abrir el frigorífico, podría enviarle una señal de que faltaba leche o de que habría que tirar un producto caducado.

Los sistemas actuales basados en la "identificación por radiofrecuencia" (RFID) dan visos de realidad a los sueños de Weiser. Consistirían en unas "etiquetas" —diminutos microchips de silicio que contienen datos de identificación y, a veces, otras informaciones— que interaccionan con lectores que automáticamente reciben y decodifican esos datos.

Todavía estamos lejos de transformar viviendas, oficinas, empresas y automóviles en entes a los que la RFID dote de capacidad de reaccionar, pero usos limitados, ya los hay. Hoy pueden encontrarse etiquetas de RFID, a menudo no mayores que un grano de arroz, en tarjetas y pulseras de identidad, pases de telepeaje adheridos a los parabrisas,



HABLAME: Interrogadas por unidades lectoras controladas por ordenadores, unas etiquetas de RFID repartidas en abundancia por la cocina (los círculos señalan dónde) indicarían, por ejemplo, que se ha tirado a la basura una bolsa de pan y hay que comprar otra.




JOHNER PHOTONICA (*fotografía*)

medios de pago rápido en gasolineras, identificaciones auriculares para el ganado, juguetes (los muñecos de la Guerra de las Galaxias de Habro) y dispositivos antirrobo de coches. También sirven para cronometrar a los participantes en carreras disputadas fuera de las pistas. Una empresa mexicana implanta desde el año pasado etiquetas subcutáneas a los niños como protección contra los secuestros.

A corto plazo, será fácil marcar con etiquetas de RFID los equipajes aéreos (British Airways ya lo ha probado), e incluso podrán incorporarse al papel moneda para desanimar a los falsificadores y permitir el control del movimiento de efectivo por los gobiernos. (Hitachi ha anunciado hace poco unas etiquetas suficientemente pequeñas para este propósito.) Mientras tanto, están en pruebas, o se empiezan a llevar a cabo, aplicaciones de la RFID útiles para el comercio minorista, los transportes, la industria y el tráfico de mercancías. Pero esta revolución también tiene su lado negativo. La proliferación de sistemas de RFID obligará a encarar problemas nuevos relativos a la intimidad, la ley y la ética. En 2003 dos grandes firmas comerciales (Wal-Mart en EE.UU. y Benetton) han tenido que suspender pruebas a gran escala de sistemas de control de inventario mediante la utilización de la RFID en sus establecimientos a causa de las reacciones del público, receloso de ser objeto de un espionaje exhaustivo con las etiquetas insertadas en los productos adquiridos.

Los entresijos del sistema

La identificación por radiofrecuencia tiene un fundamento muy sencillo. Un circuito electrónico incorporado en una etiqueta “pasiva”, sin alimentación propia —no requiere baterías ni mantenimiento—, se activa a distancia por una unidad lectora que le transmite energía de manera intermitente. Gracias a esa energía puede intercambiar información con la unidad lectora. En esencia, la etiqueta viene a ser una sencilla antena adherida a un microchip de silicio y encapsulada en un módulo de vidrio o de plástico.

El funcionamiento de las etiquetas RFID depende de varios factores, especialmente de la frecuencia a la que operan. Al principio, trabajaban sólo en las bandas de 13,56 megahertz o frecuencias inferiores. Estas etiquetas, todavía las más empleadas, no pueden separarse más de un metro de la unidad lectora y la discriminación que ofrecen es deficiente (la unidad lectora no interpreta fácilmente una multitud de etiquetas individuales muy próximas).

Las nuevas etiquetas de alta frecuencia, más depuradas, se dejan identificar por el lector con rapidez en grupos densos, incluso desordenados, si bien todavía no permiten que se distingan perfectamente todos los artículos de un carro de supermercado. (La exploración rápida y fiable de un carro de la compra lleno de artículos etiquetados con RFID es un objetivo esencial de esta técnica. Una vez se haya conseguido, la agilidad que aportarán a inventarios y controles de existencias ahorrará millones de euros a los minoristas.)

Las etiquetas que operan en alta frecuencia son susceptibles de lectura a distancias mucho mayores que las de baja frecuencia, aunque hasta el momento su alcance sigue sin superar unos pocos metros; en gran parte, porque los circuitos electrónicos de la etiqueta trabajan a una potencia muy baja, obtenida de la señal del lector, y necesitan antenas y receptores de alta sensibilidad poco costosos. Almacenan bastante más información que las de modelos anteriores, y ofrecen la posibilidad de añadir al mero código de identificación otros datos útiles. Por ejemplo, la energía captada por la etiqueta puede alimentar un sensor a bordo de un automóvil que señale la presión y la temperatura de los neumáticos con el vehículo en movimiento (Hay coches que ya lo incorporan; Michelin, BMW y Philips Semiconductor desarrollan prototipos para el mercado).

La RFID hoy en día

Los dispositivos de identificación por radiofrecuencia ya empiezan a sustituir a las tarjetas de seguridad con banda magnética para la apertura de puertas y el acceso a zonas reservadas, sobre todo cuando hay requisitos de seguridad especiales, como en las instalaciones militares. Su aplicación más visible, sin embargo, son los sistemas de peaje automático, o telepeaje. En las casetas de control las unidades lectoras exploran las etiquetas fijadas a los parabrisas de los coches que pasan. La identificación de la etiqueta se graba en el lector y el importe del peaje se carga en una cuenta de pago previo. Los sistemas están concebidos para que los coches no tengan que detenerse a su paso por el peaje.

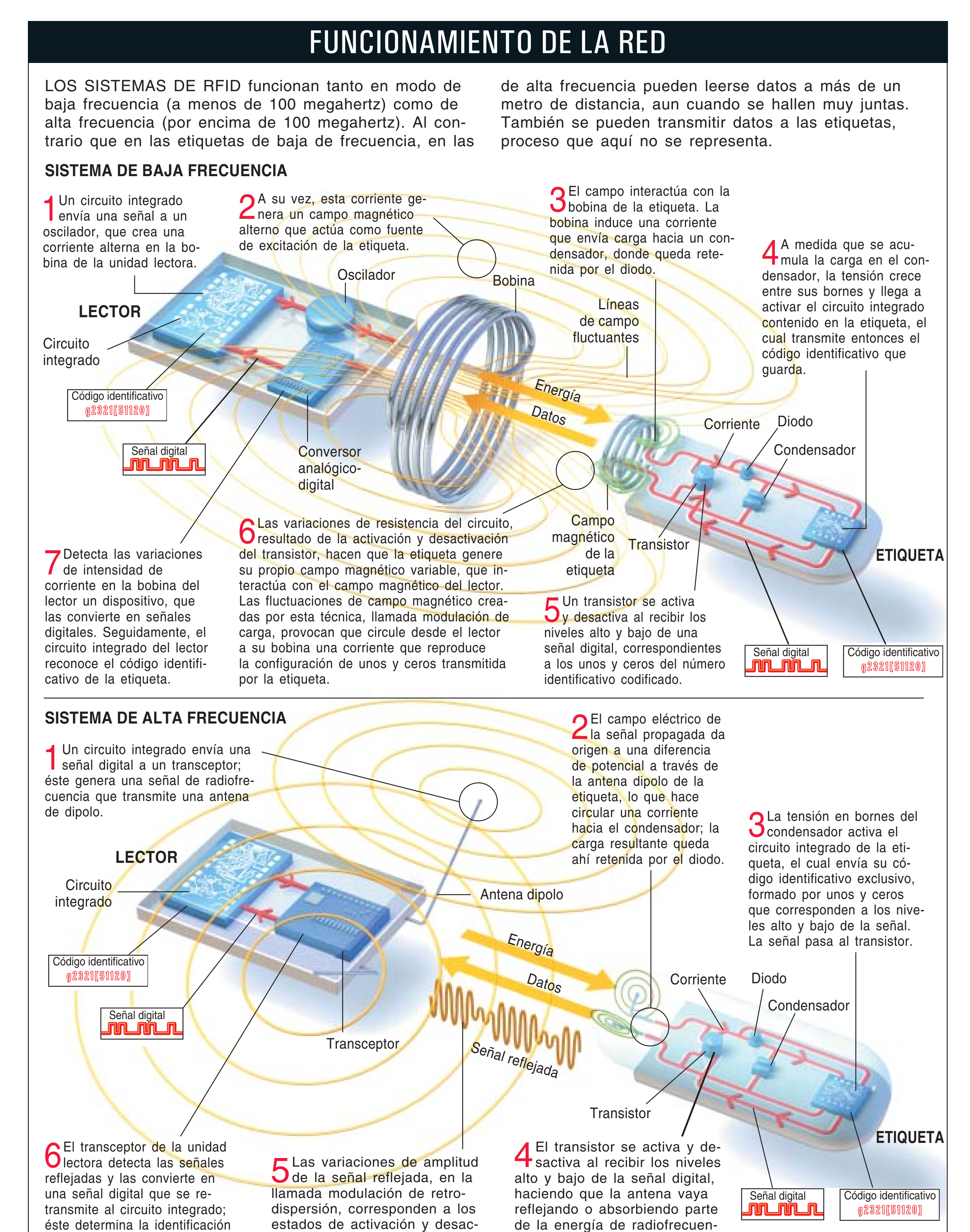
Este método de pago se aplica en numerosos países. Distintas autopistas pueden emplear versiones diferentes de la RFID. Así, en California (puente de la Bahía de San Francisco y autopista I-15 cerca de San Diego) funciona con éxito la versión FasTrak, pero en la costa atlántica el sistema E-Zpass sufrió en un principio problemas de índole administrativa y política, no propiamente técnicos. En el puente

Resumen/Técnicas de RFID

- Los sistemas de RFID se componen de etiquetas —microchips que contienen datos identificativos y, a menudo, de otro género— y dispositivos de lectura que transfieren a ordenadores la información de las etiquetas.
- Se los utiliza ya, pero de modo limitado. Se está ensayando su aplicación al seguimiento de los inventarios, desde los fabricantes a los puntos de venta.
- Cuando se perfeccione la técnica y desciendan los costes, podrían formar el núcleo de redes que atiendan muchas actividades, desde vigilar la integridad estructural de un puente hasta avisar de que la fecha de caducidad de un alimento guardado en la nevera ha pasado ya.
- Preocupa a los defensores de la intimidad que los sistemas de RFID vayan a proporcionar a los comerciantes, y quizá no sólo a ellos, informaciones personales en contra de la voluntad de los interesados.

FUNCIONAMIENTO DE LA RED

LOS SISTEMAS DE RFID funcionan tanto en modo de baja frecuencia (a menos de 100 megahertz) como de alta frecuencia (por encima de 100 megahertz). Al contrario que en las etiquetas de baja de frecuencia, en las de alta frecuencia pueden leerse datos a más de un metro de distancia, aun cuando se hallen muy juntas. También se pueden transmitir datos a las etiquetas, proceso que aquí no se representa.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

de la Bahía de San Francisco, la estrechez de los carriles de peaje impone que no se pase ante la unidad lectora a más de 40 kilómetros por hora, mientras que en el de la I-15 no hay restricción de velocidad y además el sistema sirve para la observación del tráfico. [En España, donde hay que acercarse también a menos de 40 kilómetros por hora al lector, se abrieron los primeros telepeajes en 1991, con el nombre de sistema Teletac. Recientemente se ha adoptado el nuevo sistema Vía-T, con el que se homogeneizarán todos los telepeajes de España conforme a un estándar europeo. Alrededor de un diez por ciento de los peajes de los tramos que cuentan con ese servicio se pagan mediante el sistema de RFID. La Comisión Europa implantará un sistema unificado para toda la Unión Europea a partir de 2005, gracias al cual los transportistas podrán valerse de los distintos sistemas de telepeaje europeos con un solo dispositivo de RFID. A partir de 2008, en cambio, el telepeaje unificado, que desde 2010 valdrá para todo tipo de vehículos, no debería irse efectuando ya con RFID, sino mediante posicionamiento por satélite basado en el proyecto Galileo; la transición tendría que completarse en 2012. La empresa argentina SICSA instalaba en 1995 en Buenos Aires el primer telepeaje sudamericano. Caminos y Puentes Federales de México —Capufe— ofrece la tarjeta IAVE, o de Identificación Automática Vehicular].

Los sistemas RFID también se preparan para reemplazar a los familiares códigos de barras que, mediante lectura óptica a muy corta distancia, identifican productos, controlan inventarios y semiautomatizan el pago en las tiendas. A diferencia de los códigos de barras, las etiquetas RFID pueden ir moldeadas en la envoltura de un producto y recurrir al cifrado u otros procedimientos para dificultar las falsificaciones. Por añadidura, ciertas etiquetas RFID incorporan una memoria donde las unidades lectoras escriben nuevos datos para consulta posterior. Por ejemplo, en cada transacción entre lector y etiqueta quedaría registrada la fecha, la hora y la identidad de quien hubiese accedido a esa etiqueta. Si la etiqueta va adherida a un coche, digamos, podría así adjuntarse un historial que indicara dónde se fabricó, sus anteriores propietarios, los servicios que ha prestado y los accidentes que ha sufrido.

Habida cuenta de que cada vez abundan más los sectores económicos que están ensayando sistemas de lectura de etiquetas, ciertos expertos creen que la identificación por radiofrecuencia se habrá generalizado, sobre todo en el comercio minorista, hacia el año 2010. Otros retrasan tal fecha hasta más allá del 2015, cuando el coste de las etiquetas RFID haya bajado lo suficiente para hacer viable el etiquetado de artículos de consumo baratos.

El próximo futuro

Se está empezando a utilizar el seguimiento por RFID para controlar el tránsito de una mercancía desde la fábrica a los almacenes. La RFID, probablemente, se impondrá en estas aplicaciones antes de que llegue, a gran escala, a los puntos de venta; resulta más fácil desarrollar los sistemas apropiados. Además, no alimentan tanto los temores públicos a una artera utilización de la RFID para espiar a los clientes después de abandonar la tienda. Recientemente, la cadena de tiendas Wal-Mart ha anunciado que exigirá a sus 100 proveedores más importantes que coloquen etiquetas de alta frecuencia en los pedidos enviados a sus puntos de venta. Asimismo, el Departamento de Defensa de EE.UU. obliga a sus suministradores a adoptar etiquetas de inventario RFID de alta frecuencia a partir de 2005.

Pero las posibles —e inevitables— aplicaciones de la RFID en las propias tiendas siguen tentando a los minoristas. La prueba que proyectaba Wal-Mart en asociación con Gillette, y que más tarde se anuló, iba a evaluar la capacidad de unos “estantes inteligentes”, con lectores RFID integrados para controlar los desplazamientos de millones de afeitadoras y otros productos Gillette que llevaban embutidas etiquetas RFID. (Téngase en cuenta que con el código de 96 bits les tocarían a los habitantes del planeta unos 50.000 billones de etiquetas por cabeza.) La incorporación de etiquetas a cada producto exhibido en las tiendas suele considerarse como la tarea más difícil de la RFID; mas, para los minoristas sería una bendición.

Hay que destacar que el uso de RFID en estantes inteligentes ahorraría costes de mano de obra y procuraría un aumento de las ventas al garantizar que siempre habría género a la venta. Los empleados no tendrían que vigilar los niveles de existencias si de ello se ocupa el sistema RFID. Este pondría sobre aviso a un operario cuando el descenso de las existencias obligase a realizar nuevos pedidos. El sistema hasta podría encargarse de hacerlos, sin mediación humana. Cabría, además, incluir en las etiquetas de inventario, aprovechando que son programables, datos que informen del lugar en que se fabricó y puso a la venta el artículo. Y el uso de etiquetas RFID análogas a las etiquetas magnéticas que utilizan hoy los centros comerciales podría impedir el robo del género, que ocasiona pérdidas de miles de millones de euros y dólares al año.

Wal-Mart anunció que cancelaba las pruebas en los establecimientos para concentrarse en el desarrollo de aplicaciones de la RFID para sus almacenes, fuera de la vista del público, que no requieren tantas etiquetas ni tal capacidad de cómputo. Sin negar que esto sea cierto, quienes pueden saberlo sugieren que tuvo mucho que ver con la decisión el temor de los clientes a la intrusión de la técnica RFID en su intimidad. No es nada sorprendente que influyera esta reacción, dado que casi al mismo tiempo Benetton tuvo que suspender sus pruebas a gran escala de sistemas de inventario en tienda ante las críticas del público y los medios de comunicación. La prueba de Benetton habría examinado la capacidad de la RFID de barrer expositores enteros llenos de ropas de colores, tallas y estilos diferentes, pero marcadas todas con etiquetas de RFID, así como de captar y cargar cada dato del inventario en un sistema de seguimiento para evitar que los dependientes tengan que comprobar a mano cada prenda despachada.

En otras firmas, como Procter & Gamble, Canon e International Paper,

Los aspectos ingratos

¿Qué impacto social tendrá la proliferación mundial de etiquetas y lectores de identificación por radiofrecuencia? ¿Perderemos aún más intimidad al permitir que la RFID dé a conocer nuestros movimientos y datos personales con un detalle insospechado? Antes de generalizar los sistemas de RFID se ha de dar respuesta a estas y muchas otras preguntas.

Los defensores de la intimidad temen sobre todo que las etiquetas de RFID que identifican los artículos, adquiridos con tarjetas de crédito o débito, vinculen a los compradores con determinados artículos en las bases de datos de la tarjeta o de la tienda. Los comerciantes podrían utilizar luego esos datos para guardar un registro exacto de lo que compró cada cliente, incluyendo información sobre colores, tallas, estilos y precios, información mucho más completa que la aportada por los códigos de barras. Con los datos obtenidos por la RFID cabría personalizar más la publicidad que se remite directamente a los hogares.

También preocupa que el equipo de RFID rastree automáticamente las transacciones comerciales. Cuando haya etiquetas en todas partes será más fácil descubrir nuestras mentiras sobre cómo hemos empleado el tiempo o acerca de qué hemos estado haciendo y dónde. Esto podría tener gran importancia en el mundo laboral, pues los lectores guardan registros que podrían consultarse y servir de prueba a efectos legales. Se necesitarían leyes que especificasen quiénes pueden acceder a esos registros de datos y con qué finalidad. En Europa existe ya una Ley de Protección de Datos que limita el acceso a registros informáticos de esa índole, y en EE.UU. probablemente se aprobarán normas similares.

Tenemos que afrontar también que los sistemas de etiquetado por RFID pueden realizar tareas que ahora dependen del esfuerzo humano, por lo que la adopción de esta técnica va a implicar la pérdida de un número apreciable de puestos de trabajo. Habrá que contar, pues, con la oposición de los sindicatos. Ya fue un primer aviso la enconada huelga de los estibadores de la Costa Oeste de Estados Unidos en 2002, en parte debida a la amenaza de las nuevas técnicas sobre los empleos futuros.



SE ALZARON PROTESTAS cuando la cadena británica de supermercados Tesco inició unas pruebas de RFID. "Di no a los chips espías", "Di no a la RFID", dicen estos carteles.

Protestas a favor de la privacidad

En 2003 vino la reacción contra las previsibles invasiones de la intimidad del consumidor por las aplicaciones de la RFID. Por entonces, Philips Semiconductor anunció el envío de 15 millones de etiquetas RFID al fabricante y vendedor de ropa Benetton para que las incorporase a las prendas de vestir durante la producción. Las etiquetas deberían interaccionar con una red de lectores de RFID situados en las tiendas y almacenes de Benetton para conseguir controlar los inventarios en los 5000 puntos de venta que tiene la empresa por todo el mundo.

Por mucho que Philips asegurase que no sería posible seguir la pista de la ropa etiquetada fuera de las tiendas de Benetton, según algunos expertos sí podrían crearse lectores de RFID más sensibles que los de Benetton con los que unos delincuentes podrían examinar las tarjetas de RFID a mayor distancia. Los defensores de la privacidad temían que las etiquetas no sólo fueran leídas por los lectores de las tiendas de Benetton; quienes vistiesen prendas de Benetton podrían, pensaban, ser seguidos por criminales o por el estado incluso. Un grupo estadounidense, defensor de la intimidad de los consumidores frente a los supermercados que la amenazaban, pidió que se boicotease en todo el mundo a Benetton. Consiguió finalmente que Benetton abandonase las técnicas de seguimiento por RFID. La firma se apresuró a declarar que si bien había ya probado sistemas RFID, no los utilizaba en el control de inventarios y no tenía ningún plan concreto para insertar los millones de etiquetas Philips en sus productos.

Preocupaciones similares —que las grandes empresas mantuvieran vigilados los productos de consumo en los hogares de los compradores y en las calles— afloraron en una prueba del inventariado de tiendas por RFID que planearon Wal-Mart y Gillette. Para tranquilizar a los consumidores, Gillette anunció que las etiquetas RFID iban insertadas en las envolturas, no en los propios productos y, por tanto, se las desecharía al tirar éstas. Pero, como ha escrito Declan McCullagh, comentarista de informática y defensor de la RFID por su valor práctico, "los ladrones del futuro podrían recorrer las calles con detectores capaces de descubrir etiquetas RFID en embalajes arrojados a la basura que indicasen que había costosos aparatos electrónicos en las proximidades... Cuesta mucho más mantenerse anónimo."

Un modo de evitar ese peligro consistiría en implantar un conmutador anulador en cada etiqueta RFID que la desactivara una vez realizada la compra. Audio-ID Center —consorcio de investigación financiado por empresas informáticas, con sede en el Instituto de Tecnología de Massachusetts— ha publicado unas directrices que exigen que los minoristas puedan invalidar las etiquetas RFID cuando el cliente pase por caja. Varios fabricantes, entre ellos Alien Technology, Matrics y Philips, están produciendo etiquetas con conmutadores de anulación.

McCullagh ha apuntado cuatro requisitos para la utilización de etiquetas RFID en productos de consumo, a saber: que se advierta a los clientes de que existen etiquetas RFID en lo que están comprando (podría figurar en una nota impresa en el recibo de la compra); que todas las etiquetas resulten claramente visibles y fáciles de suprimir; que se las invalide siempre en las cajas de los establecimientos; y que, cuando sea posible, se las coloque sólo en la envoltura del producto, no en el propio producto.

CHRIS MCDERMOTT/NOTAGS.CO.UK

SEGUIMIENTO INDIVIDUAL CONTINUADO

LOS SISTEMAS RFID se encargarán de un modo automático de vigilar productos como la imaginaria salsa de tomate Mama's y de encargar nuevos pedidos para reponer existencias. El seguimiento será individualizado para cada artículo. Se presenta un posible ejemplo.

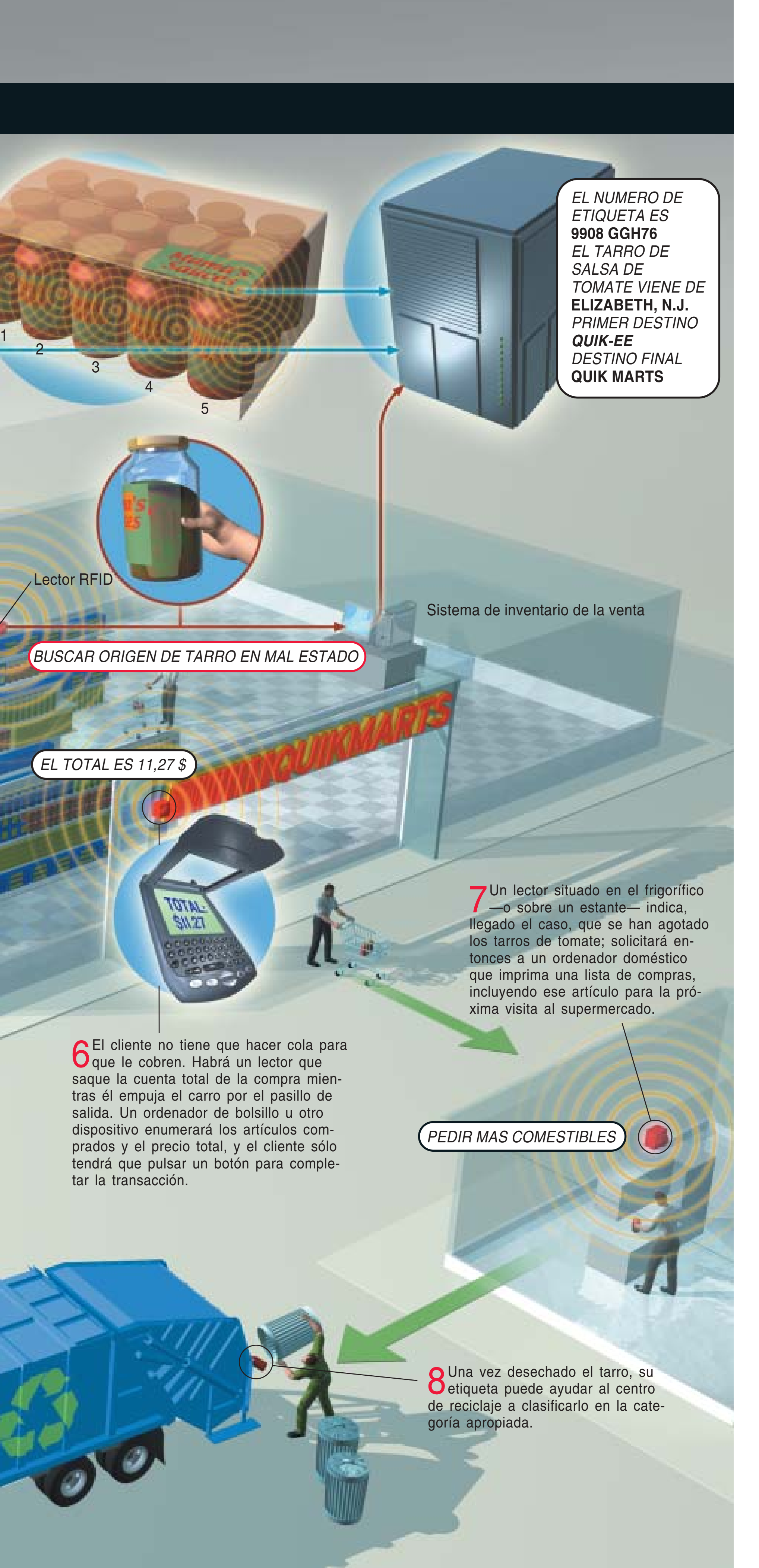
1 Se fija una etiqueta RFID en cada tarro de salsa de tomate a su paso por una cinta transportadora. Un lector detecta el código identificador exclusivo de esa etiqueta y lo introduce en una lista, dispuesta ya para que se la envíe a una base de datos centralizada.

2 Se dispone para envío una plataforma cargada con cajas que contienen tarros de salsa Mama's.

3 Cuando el lector explora en la fábrica cada una de las cajas —y cada tarro de cada caja—, responde secuencialmente con su código de identificación. La fábrica envía listas de códigos, tanto desde la cinta transportadora como desde las cajas embaladas, a un sistema informático de Internet (*flechas azules*), donde se almacenan en una base de datos que vincula cada tarro, caja y plataforma a la fábrica de origen.

4 Un lector en el centro de distribución detecta el tarro de salsa y la caja entera. Interrogado el sistema informático del fabricante sobre la identidad del tarro y la información de ruta, el tarro se dirige automáticamente al camión 47 sin que nadie tenga que abrirlo ni examinar las cajas.

5 El envío de la salsa de tomate llega al supermercado y se incorpora automáticamente al inventario del almacén. Cuando las existencias desciendan por debajo de un nivel preestablecido, el sistema de inventario solicitará un nuevo envío transmitiendo un mensaje a los servidores informáticos del fabricante. Si un tarro está en mal estado o ha sido manipulado, el sistema podrá preguntar al servidor del fabricante qué planta fue la que fabricó el producto.



prosiguen las pruebas de sistemas de inventario en almacenes y tiendas. La primavera pasada, la cadena alemana Metro abrió una "tienda del futuro", equipada con un sistema de gestión de inventarios por RFID que comprende estantes y básculas inteligentes provistos de lectores RFID capaces de identificar los tipos de producto. Además, los carros de la compra llevan unas etiquetas que se leen para medir el tráfico de clientes y señalizar automáticamente la apertura y cierre de las cajas del establecimiento. El programa piloto de Metro es obra de Intel y de la casa alemana SAP, dedicada a la creación de programas de ordenador. Participan asimismo más de 30 empresas; entre ellas, Hewlett-Packard, Cisco Systems y Philips.

Más allá del horizonte

Los sistemas de inventariado por RFID aún distan mucho de alcanzar el sueño de Weiser: no son de gran ayuda en nuestra vida diaria. Ciertamente, los procesadores y la microelectrónica esparcidos por nuestro hogar —en tostadoras, juegos, aparatos de vídeo y audio, y otros artilugios— requieren una atención mayor, no menor. Hay que configurar y controlar docenas de dispositivos, transferir datos de uno a otro e intentar averiguar cuáles pueden ser las causas de los fallos que aparezcan. Hasta para manejar un reloj de pulsera o un televisor se requiere un manual de instrucciones. Para que la computación se torne invisible, no sólo ha de extenderse por doquier, sino que ha de ser lo que David Tennenhouse, de Intel, llama "proactiva", es decir, debe anticiparse a lo que necesitemos y proporcionárnoslo sin obligarnos a una serie de trabajos previos.

Para establecer una computación proactiva a gran escala, es preciso instalar redes de lectores RFID por todo el entorno. Mirando al futuro, cabe concebir dos tipos de redes RFID proactivas, ambas constituidas por una malla de lectores interactivos que observan multitud de etiquetas de RFID y transmiten a ordenadores distantes la información que recogen.

Uno de esos tipos de red está formado por lectores fijos en sus

emplazamientos e interconectados por cables. Su misión consistiría en excitar y leer etiquetas —algunas de ellas provistas de sensores— también inmóviles. (Si fuera necesario, las etiquetas podrían además ser leídas por lectores móviles que pasaran cerca de ellas.)

Este tipo de red podría instalarse en un puente: las etiquetas estarían profundamente enterradas en elementos de la estructura de hormigón, soldadas a las junturas de las vigas de acero e instaladas en otros lugares donde los sensores que llevarían incorporados pudiesen medir esfuerzos y cambios. Recogerían y almacenarían informaciones reveladoras: por ejemplo, que la flexión de un miembro de la estructura durante un seísmo ha superado los límites de seguridad. Los lectores se alimentarían de las líneas eléctricas ordinarias de corriente alterna o mediante cables de la red de lectores, y tendrían acceso, por cable también, a Internet a fin de poder enviar sus datos a ordenadores que los analizarían y decidirían la actuación oportuna.

En el segundo tipo de sistema, la "red inalámbrica *ad hoc*", ningún lector o etiqueta sensora ocuparía posiciones permanentes. Los lectores de RFID se colocarían donde hiciese falta, igual que se elige el punto de instalación de una lámpara. Leerían las etiquetas instaladas a su alrededor; algunas, inmóviles, con sensores o no, otras móviles, adheridas a dispositivos y personas que circulasen a través de la red. Los lectores se alimentarían de la red de corriente alterna si estuviesen próximos a tomas de corriente, o bien por baterías. Estas unidades lectoras, también llamadas nodos de la red, establecerían entre sí conexiones inalámbricas de corto alcance. La información saltaría por medios inalámbricos de nodo a nodo (por lo que a veces a estas redes se las denomina "multi-hop" o de saltos múltiples), hasta alcanzar un nodo cabecera que dispondría de conexión a Internet.

Podrían crearse así redes *ad hoc* con multitud de lectores que observaran cientos de etiquetas sensoras, esparcidas por decenas de kilómetros cuadrados, que recogerían datos para mejorar las predicciones meteorológicas. Gracias a la detección simultánea de las velocidades del viento en muchos puntos de una zona, el ordenador podría percibir la primera etapa de formación de un tornado y generar una alerta con más anticipación de lo que hoy es posible.

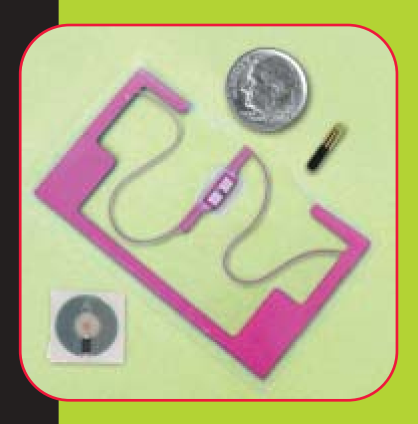
Una red *ad hoc* de RFID instalada en un edificio de oficinas ejecutaría muchas tareas. La lectura de etiquetas sensoras de la temperatura en diferentes habitaciones permitiría mantener condiciones constantes en todo el edificio o en un solo piso. Otros lectores podrían explorar las tarjetas de seguridad de los empleados y reconocer las etiquetas fijadas en sus ordenadores portátiles con el fin de permitirles acceder a datos centralizados o conectarse con compañeros en cualquier otro lugar del edificio. Una larga lista de centros de investigación universitarios y de compañías privadas investigan el diseño de todo tipo de redes de sensores.

Desafíos técnicos pendientes

- Tanto las etiquetas como los lectores RFID dependen de la orientación. Las etiquetas deben situarse adecuadamente con respecto a los lectores a fin de que las bobinas de antena puedan intercambiar señales. Para resolver este problema se desarrollarán sistemas de lectores múltiples: consistirán en una red de lectores colocados de forma que cubran todas las orientaciones posibles de los artículos etiquetados en un expositor de una tienda. Esta solución comprenderá también protocolos que coordinen el funcionamiento de las redes de lectores.

- Las señales de RFID se bloquean con facilidad. En distancias cortas, las atenúan ciertos materiales (el caso más común es el de los embalajes compuestos de sustancias metálicas); a mayores distancias, al ser mucho más débiles que las de la radiodifusión comercial, pueden quedar cegadas por objetos corrientes, como el mismo cuerpo humano. Para resolver el problema se estudian nuevos diseños de las antenas de etiquetas y redes de lectores más sensibles.

- Las etiquetas de RFID todavía cuestan demasiado (de 20 a 30 céntimos por unidad), sobre todo si se las quiere aplicar a las ventas al por menor, en especial de productos baratos que dejen poco margen, como los caramelos o las pastillas de jabón. Por tal motivo, los minoristas de productos de consumo masivo, que operan con márgenes de ganancia muy ajustados, se muestran reticentes a adoptar las técnicas de inventario y despacho basadas en la RFID. Se pretende reducir a 10, e incluso a 5 céntimos, el coste de una etiqueta en algunos años. Hay quien cree que, a esos precios, la RFID no se implantará antes de 2010, si es que se implanta alguna vez. Otros sostienen que la RFID sólo llegará a ser de uso en las tiendas si el coste unitario se rebaja hasta menos de un céntimo; no sucedería hasta el 2015, como mínimo.



LA DIVERSIDAD DE ETIQUETAS RFID refleja la falta de una normativa para esa técnica.

CORTESIA DE ROY WANT

- La existencia de estándares incompatibles para lectores y etiquetas de RFID impiden una aplicación universal. Los diferentes fabricantes desarrollan protocolos de etiquetas que funcionan en distintas frecuencias, con una diversidad de formatos de los paquetes de datos transmitidos por la etiqueta al lector. Lo ideal sería adoptar una norma única que hiciera a todas las etiquetas compatibles con todos los lectores.

Estudian los problemas de coste y de normalización tanto diversas empresas como el Auto-ID Center y la ISO (Organización Internacional de Normalización), consorcios industriales que trabajan en la elaboración de normas para las etiquetas de RFID.

El entorno sensible

Cuando se hayan instalado en todas partes redes de identificación por radiofrecuencia, con lectores y etiquetas a nuestro alrededor que alimenten de datos a ordenadores preparados para generar reacciones a ese flujo de información, habremos alcanzado la situación imaginada por Weiser, con la informática integrada invisiblemente en el quehacer cotidiano. Alcanzada esa integración, la RFID se encargará incluso de las actividades más sencillas. Así, los productos informáticos provistos de RFID podrán "dialogar" y configurar sus conexiones por su cuenta. Un compañero de Intel, Trevor Piercing, ha estado explorando la manera de configurar automáticamente enlaces de red inalámbrica entre ordenadores y periféricos móviles. Si comprásemos una impresora con capacidad de conexión a una red inalámbrica (a Bluetooth, por ejemplo) y con etiqueta de RFID, bastaría con desembalar el dispositivo y acercarlo a nuestro ordenador: en cuanto éste leyese la etiqueta de RFID de la impresora, se conectará a ella automáticamente, eliminando los complejos diálogos de configuración.

El campo de aplicación de la identificación por radiofrecuencia es inmenso y podría incluso extenderse a la asistencia de enfermos de Alzheimer. Eric Dishman, también de Intel, trabaja en un sistema destinado a que mantengan su independencia quienes padecen pérdida de memoria. En un sistema prototipo, se han etiquetado todos los objetos necesarios para preparar una taza de té. Si el paciente toma al menos dos objetos —una bolsa de té y el azucarero, por ejemplo—, el sistema deduce, a través de la identificación y la posición relativa de los objetos, que es preciso ayudarle. Entonces rastrea la secuencia en que se utilizan los objetos con miras a inferir si la persona se ha "atascado" y, en tal caso, le presta asistencia vocal grabada.

En un dominio muy distinto, PSA Corporation, Hutchinson-Whampoa y P&O Ports —los tres mayores operadores de puertos marítimos del mundo— han dado los primeros pasos hacia un sistema de seguridad antiterrorista basado en la RFID. Los contenedores que transporten los buques de carga se equiparían con etiquetas sensoras ocultas, diseñadas para detectar radiación o agentes químicos o biológicos en armas de contrabando. En la actualidad, el sistema sólo puede detectar si el contenedor ha sido abierto durante su recorrido por una persona no autorizada. Podría ampliarse de modo que en cada etapa del viaje de un contenedor —el lugar de origen, su transporte por tierra, el almacenaje en los muelles y la navegación en buques— los lectores interrogasen a la etiqueta para determinar si había detectado materiales peligrosos. El sensor de la etiqueta registraría permanentemente cualquier exposición, por breve que fuera, a tales sustancias y señalaría el incidente en la siguiente estación de lectura.

En último término, podría diseñarse una agenda digital que funcionara como lector de etiquetas de RFID, de tal manera que etiquetas colocadas casi en cualquier lugar de nuestro entorno nos asistiesen por anticipado. Desde un rótulo con etiquetas de RFID colgado en una estación de tren, la agenda podría recibir una dirección de Internet que contuviese los horarios. De modo análogo, las agencias inmobiliarias fijarían etiquetas en los carteles que indicasen que una casa estaba en venta; al pasar por delante, no habría más que dirigir la agenda hacia el anuncio y descargar de Internet fotografías e información sobre la finca.

Subsisten desafíos técnicos considerables, y transcurrirán años, quizá décadas, antes de que podamos disfrutar de estas aplicaciones maduras de la RFID. No obstante, a medida que aparezcan en nuestro entorno las redes de etiquetas y lectores de RFID, podremos apreciar más y más cómo esta técnica —en combinación con Internet— enriquece la capacidad de los ordenadores de recibir estímulos del mundo físico y darles respuesta.

En el artículo publicado en 1991 por esta revista, Weiser escribía: "Un paseo por el bosque nos ofrece más información que cualquier sistema informático, a pesar de lo cual la caminata nos parece relajante y los ordenadores frustrantes. Las máquinas que consigan ajustarse al entorno humano en lugar de obligar a las personas a entrar en el mundo de la computación harán que su uso resulte tan agradable como un paseo por los pinos." Si se la utiliza con sensatez, la RFID tendrá la facultad de convertir la informática en una parte natural e intuitiva de la vida cotidiana.

El autor

Roy Want es ingeniero de Intel Research/CTG en Santa Clara, California, donde dirige un proyecto que establece un programa de investigación de largo alcance sobre computación omnipresente. Anteriormente, en Olivetti Research, Want se propuso conseguir un sistema automático de localización de personas dentro de edificios. En Xerox PARC dirigió el desarrollo de uno de los primeros sistemas informáticos conscientes del contexto; trabajó en aplicaciones de las etiquetas electrónicas y en el diseño de agendas digitales con interfaces manipulados por el usuario. Es titular de más de 50 patentes sobre sistemas informáticos móviles y distribuidos.

Bibliografía complementaria

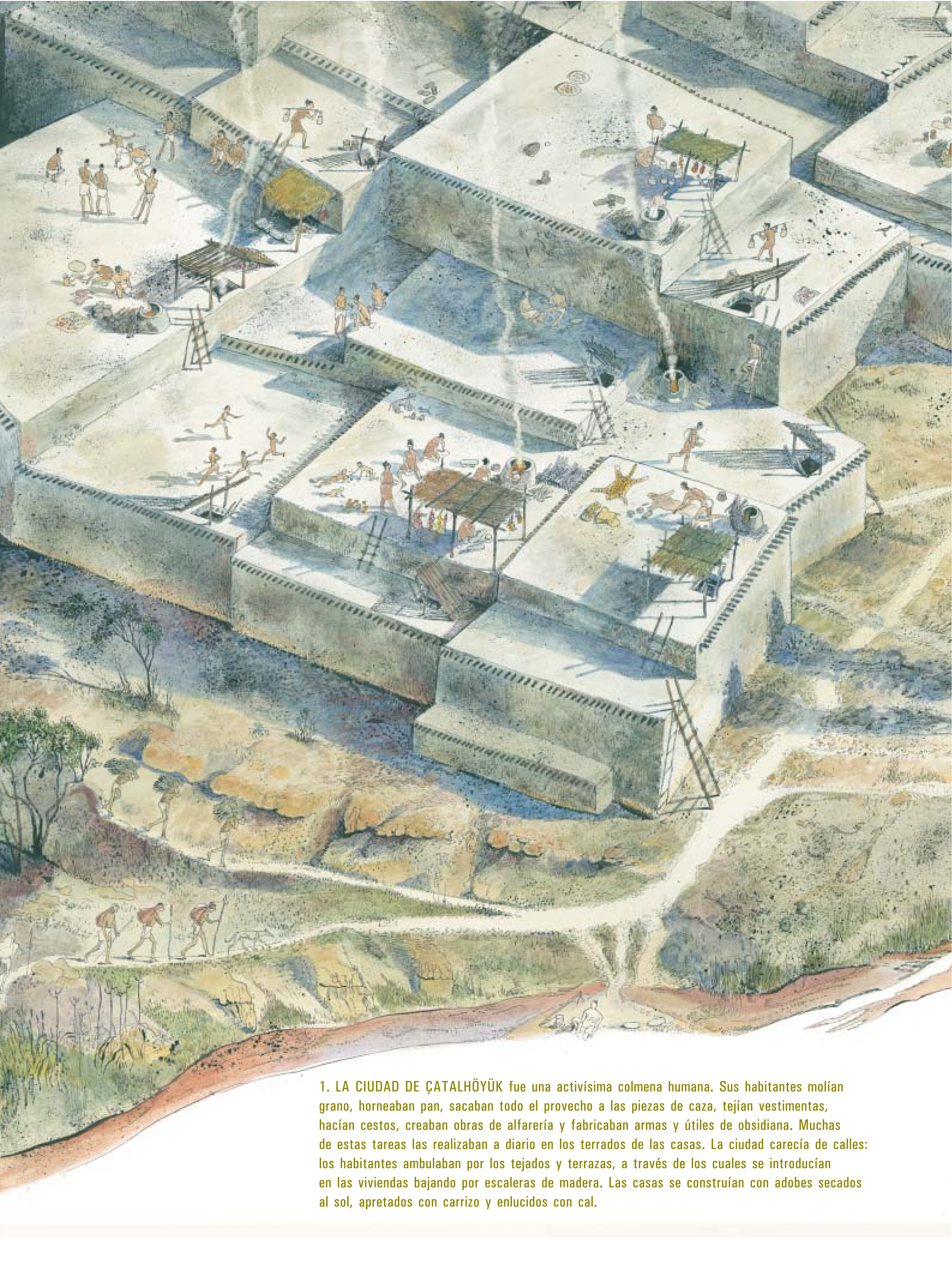
EL ORDENADOR DEL SIGLO XXI. Mark Weiser en *Investigación y Ciencia*, noviembre de 1991.

UBIQUITOUS ELECTRONIC TAGGING. Roy Want y Dan M. Russell en *IEEE Distributed Systems Online*, vol. 1, n.º 2; septiembre de 2000.

CONNECTING THE PHYSICAL WORLD WITH PERVASIVE NETWORKS. Deborah Estrin, David Culler, Kris Pister y Gaurav Sukhatme en *IEEE Pervasive Computing*, vol. 1, n.º 1, págs. 59-69; enero-marzo de 2002.

COMPARING AUTONOMIC AND PROACTIVE COMPUTING. Roy Want, Trevor Pering y David Tennenhouse en *IBM Systems Journal*, vol. 42, n.º 1, págs. 129-135; enero de 2003.

THE RFID HANDBOOK. Klaus Finkenzeller. John Wiley & Sons, 2003.



1. LA CIUDAD DE ÇATALHÖYÜK fue una activísima colmena humana. Sus habitantes molían grano, horneaban pan, sacaban todo el provecho a las piezas de caza, tejían vestimentas, hacían cestos, creaban obras de alfarería y fabricaban armas y útiles de obsidiana. Muchas de estas tareas las realizaban a diario en los terrados de las casas. La ciudad carecía de calles: los habitantes ambulaban por los tejados y terrazas, a través de los cuales se introducían en las viviendas bajando por escaleras de madera. Las casas se construían con adobes secados al sol, apretados con carrizo y enlucidos con cal.



El mayor poblado neolítico conocido nos revela algunas claves sobre los papeles que correspondían a cada sexo en las sociedades agrícolas arcaicas

La división sexual en Çatalhöyük

Ian Hodder

Hace 9000 años, en las llanuras de la Turquía interior, un grupo de pobladores neolíticos se estableció en la orilla de un río. La ciudad que allí construyeron, Çatalhöyük, creció hasta albergar unos 8000 habitantes en sus 2000 casas. Adensada la población en 10,5 hectáreas de terreno, sin calles, la gente se trasladaba de un sitio a otro por los tejados. Por el tejado se entraba también a la vivienda; bajando por una escalera se accedía a la estancia principal, repleta de pinturas y esculturas que representaban toros, venados, leopardos, buitres y figuras humanas.

Aquellos pobladores de las postrimerías de la Edad de Piedra disponían de útiles líticos finamente pulidos. Habían domesticado cereales y ovejas. Cazaban venados, cerdos y caballos salvajes y sabían aprovechar plantas silvestres. Aunque no se trata del poblado agrícola más antiguo, este yacimiento siempre ha ocupado un lugar en los debates sobre el estilo de vida de los agricultores primitivos. Su interés reside en el tamaño del poblado, notablemente extenso para la época, y su elaborado patrimonio artístico.

Una de las cuestiones que pronto se estudiaron en Çatalhöyük fue el papel de la mujer en las primeras sociedades agrícolas. Sostiene una arraigada tradición del pensamiento europeo que, en su mayoría, aquellas sociedades rendían culto a una poderosa diosa madre y se organizaban en matriarcados: mandaban las mujeres, femenina era la línea de parentesco y de madre a hijas pasaba la herencia. La idea de una fase agrícola en la que la diosa se erigió en potente símbolo se convirtió, en las postrimerías del siglo XX, en un dogma central de los movimientos de la Nueva Era. Muchos seguidores entusiastas han visitado Çatalhöyük para sentir el influjo de la diosa mientras rezan y danzan en círculo.

¿Fue Çatalhöyük el baluarte de este supuesto dominio femenino? Reanudadas las excavaciones del yacimiento en los años noventa, tras un cuarto de siglo de interrupción, se han obtenido nuevas pruebas de la división sexual en este lugar





2. ESTATUILLA DE ARCILLA. Representa una oronda mujer sentada entre dos leopardos. Se halló en un granero, donde probablemente la pondrían para promover, por magia simpatética, la fertilidad de las semillas. Cuando se la descubrió, a comienzos del decenio de los sesenta (durante las primeras excavaciones), fue interpretada como 'la diosa madre'. Hoy se prefiere considerarla símbolo del poder jerárquico de las mujeres. Con sus 16,5 centímetros de altura, es una de las imágenes de mayor tamaño halladas en el yacimiento.

JAMES MELLAART

del centro de Turquía hace 9000 años. Ha llegado el momento de abordar qué implicaba ser hombre o mujer en Çatalhöyük.

La diosa madre

Hasta el siglo XVIII, los eruditos europeos habían creído, basándose en Aristóteles y en interpretaciones de la Biblia, que el desarrollo político de la sociedad empezó con el patriarcado. Durante esa centuria, sin embargo, los relatos procedentes de Norteamérica hablaban de sociedades en las que la herencia seguía la línea femenina. A comienzos del siglo XIX, Johann Bachofen, un abogado suizo, propuso que al patriarcado le había precedido una fase matriarcal. Estas ideas influyeron, durante la segunda mitad del siglo XIX y a lo largo de todo el siglo XX, en muchos estudiosos; entre ellos, Sigmund Freud, V. Gordon Childe y Jacques Cauvin.

La primera campaña de excavación de Çatalhöyük la emprendió James Mellaart, de la Universidad de Londres. Con su esposa Arlette trabajaron en el yacimiento desde 1961 hasta 1965. Dada su formación en la escuela europea tradicional, no resulta extraño que al descubrir imágenes de mujeres opulentas diese por supuesto que se trataba de representaciones de la diosa madre. Una de las estatuillas de arcilla encontradas, por ejemplo, reproduce una oronda matrona desnuda: sentada en un trono flanqueado por felinos (probablemente leopardos), en cuyas cabezas apoya las manos, parece evocar a la reina y señora de la naturaleza.

Las publicaciones de Mellaart sobre el yacimiento, ilustradas con imágenes de mujeres robustas, gozaron de amplia difusión. Pero fue otra arqueóloga, Marija Gimbutas, de la Universidad de California en Los Angeles, quien mejor supo apuntalar la hipótesis de la diosa madre. En numerosos escritos, entre ellos su libro *Gods and Goddesses of Old Europe*, aparecido en 1974, defendió con vehemente constancia la existencia de una primera fase matriarcal, evidente en Çatalhöyük pero presente también en toda Europa con el desarrollo de la agricultura. Sostenía que las sociedades patriarcales vinieron después, junto con la metalurgia, la doma del caballo y el arte de la guerra.

En fecha más cercana, los antropólogos culturales han comenzado a abandonar esas teorías por ser demasiado generales y simplificadoras. Las sociedades actuales y del pasado reciente nos ofrecen un cuadro muy distinto cuando se atiende a las funciones relacionadas con la división sexual. Además, tampoco se han hallado pruebas que demuestren la existencia de auténticos matriarcados. Lo que sí indican la arqueología y la historia, en cambio, es que en las sociedades más recientes y contemporáneas, las mujeres desarrollan cierta forma de autoridad o poder, sea en determinado momento de su vida, sea en contextos específicos. A tenor de las pruebas etnográficas, las sociedades encierran mayor complejidad que la que se deriva de una división tajante entre matriarcado y patriarcado. Justamente lo que se aprecia en Çatalhöyük.

La dieta

Hasta la fecha, sólo se ha excavado el 4 por ciento del yacimiento de Çatalhöyük. Hemos descubierto 18 ni-

Resumen/La vida en Çatalhöyük *ca.* 7000 a.C.

- El yacimiento de Çatalhöyük, en Turquía, de unos 9000 años de antigüedad, revela una curiosa ciudad de miles de casas apiñadas, sin calles.
- Para entrar en su vivienda, los habitantes bajaban por escaleras desde los terrados. Las paredes se embellecían con pinturas y esculturas.
- Los estilos de vida de hombres y mujeres no parece que fueran muy distintos. Puede que un sexo ejerciera más poder que el otro durante ciertos períodos y en determinadas esferas: los varones en la caza y las mujeres en el campo, por ejemplo. Sin embargo, los datos recogidos hasta ahora indican que ambos sexos desempeñaban papeles clave en la sociedad, así como en las funciones religiosas.

veles consecutivos de habitación, que cubren en total unos 1200 años. La mayor parte de nuestro conocimiento actual procede de los niveles intermedios e inferiores, que han sido examinados con cierto detenimiento.

Algunos de los indicios más convincentes sobre la respectiva condición social del hombre y la mujer en los niveles antiguos e intermedios de Çatalhöyük son los relacionados con la dieta. Si mujeres y hombres hubiesen llevado estilos de vida muy diferentes y si ellas hubiesen dominado sobre ellos o viceversa, cabría esperar desigualdades en la dieta. El más poderoso tendría acceso a alimentos como la carne o sus mejores trozos. Pese a esforzarnos en buscar pruebas que así lo indicasen, no hemos hallado diferencias claras.

Dos de mis colegas, Michael P. Richards, de la Universidad de Bradford, y Jessica Pearson, de la Universidad de Oxford, han analizado los isótopos estables en huesos antiguos de Çatalhöyük, para averiguar de qué se alimentaban sus habitantes. Estos enterraban sus muertos en el subsuelo del hogar. En un edificio encontramos 62 cuerpos. El análisis de estos esqueletos no detectó ninguna variación estadística entre los isótopos estables de los huesos masculinos y los de los femeninos. Lo mismo ocurrió con los dientes, que estudió Basak Boz, de la Universidad Hacettepe de Ankara, en colaboración con Peter Andrews y Theya Molleson, del Museo de Historia Natural de Londres. Las caries abundan más en las mujeres, pero el desgaste dentario sigue el mismo patrón en ambos sexos.

A partir de la forma del desgaste y la rotura de los huesos, Molleson ha demostrado que varones y mujeres realizaban tareas muy similares en el transcurso de su existencia [*véase* "La lección de los huesos de Abu Hureyra", por Theya Molleson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1994]. Un curioso hallazgo respalda esta hipótesis. Andrews y Molleson habían notado que muchas de las costillas tenían una raya a lo largo de la cara interna. Su análisis indicó que contenía carbono. Los habitantes de Çatalhöyük vivían en pequeñas casas poco ventiladas en las que se acumularía el humo del hogar. El enlucido de sus paredes estaría, pues, cubierto de hollín; el mismo hollín que invadía sus pulmones.

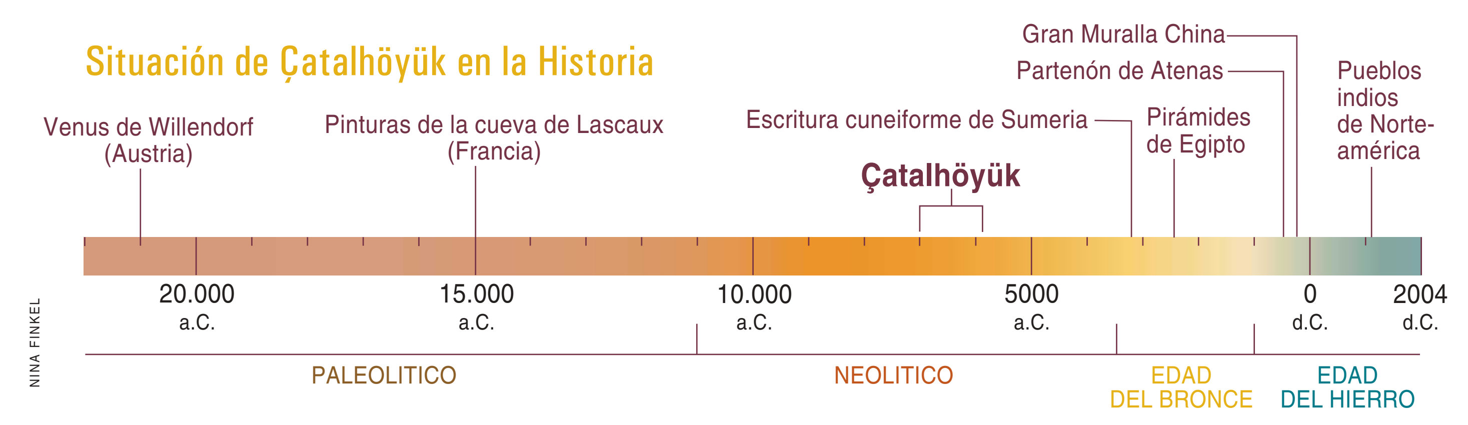
La abertura del techo que permitía la entrada a la vivienda constituía también la salida del humo del fuego hogareño. El invierno, extremadamente frío en esa zona, obligaba a las familias a pasar gran parte del tiempo en casa; respiraban aquel aire cargado de humo, que se acumulaba en sus pulmones. Tras el entierro y durante la descomposición del cadáver, el hollín se fue depositando en la cara interna de las vértebras. Este fenómeno se ha hallado en varones y en mujeres. No podemos, pues, admitir la hipótesis de que los hombres se ausentaban más que las mujeres. Todos los indicios apuntan, además, a que pasarían un tiempo muy parecido en el interior de la vivienda.

Del estudio de los restos óseos se desprende que los hombres eran más altos que las mujeres, si bien las tallas no presentaban gran variedad. Los huesos revelan que, en relación con la altura, las mujeres solían ser más robustas que los hom-

3. ÇATALHÖYÜK se asentó en la ribera de un río, en un enclave rodeado de terrenos pantanosos. Actualmente, el río está seco y la región, a 915 metros sobre el nivel del mar en el altiplano de Anatolia, está cubierta de fértiles campos de trigo.



Situación de Çatalhöyük en la Historia



NINA FINKEL

UNA VIVIENDA DE LA EDAD DE PIEDRA

EN 1958 SE DESCUBRIO, sobre un cerro de la llanura del interior de Turquía, un asentamiento de las postrimerías de la Edad de Piedra. El yacimiento, cuya antigüedad se remonta a 7000 años a.C., resultó ser mucho más que una aldea. Con mayor propiedad, se trataba de una ciudad: Çatalhöyük ("cerro ahorquillado"). Había contado con varios miles de habitantes que gozaron de una organización social compleja, vida religiosa rica, nivel técnico elevado (tejidos, cerámicas, utensilios de obsidiana) y talento para la pintura y la escultura.

En una extensión de 10,5 hectáreas se identificaron 18 niveles de edificación superpuestos. La costumbre de construir una estructura encima de otra, aprovechando los muros de la anterior para el fundamento de la siguiente, dio lugar a planos bastante uniformes. Sin embargo, los constructores se las ingeniaron para variar las distribuciones de los distintos niveles: subdividían los habitáculos o juntaban algunos de ellos y creaban un espacio único en vez de una o más habitaciones. Así, la monotonía de las viviendas apiladas quedaba rota por agradables irregularidades.

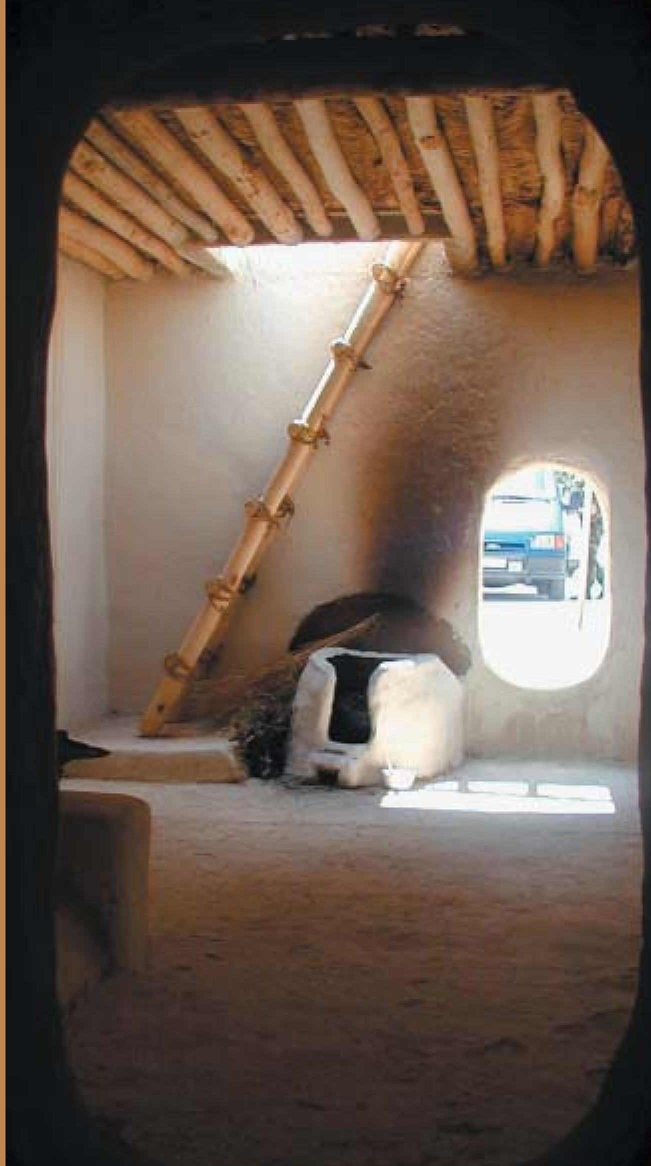
Con todo, el orden lineal y la planificación prevalecieron: en el trazado de las casas, en el tamaño de los adobes, en la altura de las paredes y las puertas, en las cocinas y los hornos, y hasta en el tamaño de las habitaciones. Las superficies de las casas oscilan entre 11 y 48 metros cuadrados, aunque todas son invariablemente rectangulares. Construidas con vigas de madera, ladrillos de barro secados al sol, entramados de caña y yeso, parece que todas las viviendas tenían una única planta. Las techumbres se construían con armazones de haces de carrizo cubiertos con una gruesa capa de adobe y sujetados por debajo con esteras para evitar la caída de barro o de fragmentos de caña.

Una de las características más singulares de Çatalhöyük es el acceso al interior de las viviendas. En cada casa había una escalera de madera. Uno de sus lados se apoyaba contra el muro del sur, donde ha dejado marcada en el enlucido una línea diagonal fácilmente reconocible. Se entraba bajando por esa escalera desde una abertura del techo, que a su vez constituía la salida del humo procedente del hogar, los hornos y las lámparas. Para subir a los terrados desde fuera de la ciudad se usaban escaleras de mano movibles. En los interiores abundaban las esculturas y las pinturas murales (las primeras pinturas halladas sobre paredes de edificios). La habitación principal servía para cocinar, comer, dormir y muchas otras actividades. La cocina estaba siempre en el lado sur para facilitar la salida del humo por el agujero de la techumbre. A las estancias secundarias, usadas como despensa o almacén, se llegaba desde la habitación principal por unas puertas tan bajas que obligaban a agacharse o incluso gatear.

A lo largo de las paredes de la habitación principal y encastradas en ellas, había plataformas salientes para sentarse, trabajar o dormir. Estos elementos estaban enyesados y enlucidos con tanto esmero como el resto de la casa. A menudo, se los cubría con esteras o colchonetas que servían de base a cojines, colchas o ropa de cama. En ninguno de los edificios había espacio para que durmiesen más de ocho personas. En la mayoría de los casos, la familia era probablemente más reducida. Debajo de dichas plataformas se enterraban los difuntos. Algunos cadáveres, prietamente envueltos en fajas y en postura encogida, se introducían en cestos.

Hasta la fecha no se ha descubierto ningún pozo; pero algunos edificios tenían zonas de aseo. Heces y basuras se sacaban de los habitáculos y se amontonaban en vertederos, que se esterilizaban con gruesas capas de cenizas. Las casas se mantenían escrupulosamente limpias; raramente se encuentran en ellas huesos rotos u otros restos de comida.

Nada sugiere que la defensa fuese la razón que impulsó a los habitantes de Çatalhöyük a construir sus moradas de un modo tan peculiar, con una sola entrada a través del techo. Tampoco se han hallado indicios de saqueos o matanzas cometidos durante los 1200 años de existencia conocida de la ciudad. La explicación más verosímil del apiñamiento de las casas es que sus habitantes querían que se los enterrara encima o muy cerca de sus antepasados. Poco a poco el espacio circundante, disponible para construir nuevas viviendas, desapareció. La densidad de casas llegó a ser tal, que no quedó otra opción que entrar en ellas por el techo. La causa del abandono final de la población está aún por conocerse.



LOS ARQUEOLOGOS que trabajan en Çatalhöyük han reconstruido una casa típica. Han enyesado las paredes del interior y los útiles encastrados en ellas; después, las han pulido con piedras abrasivas. Han experimentado con mezclas de diversos pigmentos para reproducir las pinturas de las paredes. Con estiércol y madera de varias clases han encendido el horno y han analizado los residuos comparándolos con restos arqueológicos de brasas. Así reconstruida, esta casa da cierta idea de lo que debían de ser aquellas viviendas. Asimismo, plantea muchas cuestiones acerca de la iluminación y la circulación del aire interior mientras se usaban los hornos.



ÇATALHÖYÜK RESEARCH PROJECT

bres. Así, las figurillas de damas exuberantes que Mellaart descubrió quizá fuesen bastante realistas. Con todo, varios indicios sugieren dietas y estilos de vida similares entre mujeres y hombres. Parece poco probable que cada sexo estuviese especializado en tareas determinadas o viviese el día a día de manera muy distinta.

Sin embargo, esto no niega la existencia de ciertas diferencias basadas en el sexo. Una obvia, la relacionada con el parto. El estudio de huesos humanos ha revelado una elevada tasa de mortalidad infantil. Asimismo, son varios los casos de mujeres enterradas con bebés, lo que tal vez indique que madre e hijo murieron durante el parto. Pero ni el análisis de la dieta, ni el de los huesos aportan señales patentes de un estilo divergente de vida que se tradujera en diferencias de estatuto o jerarquía.

Ritos funerarios

Tratamos de ahondar en la organización de esta sociedad neolítica estudiando una costumbre que, vista desde nuestra perspectiva actual, resulta extraña: las sepulturas de cadáveres decapitados. A los difuntos se los enterraba enteros, pero en algunos casos, pasado un año, el cadáver se exhumaba y la cabeza se separaba del tronco con un cuchillo que dejaba marcas de los cortes. Los cráneos se guardaban para fines ceremoniales. A veces terminaban en las casas para utilizarse en la celebración de ritos extáticos. Estas prácticas forman parte de una tradición muy difundida entre los primitivos agricultores de Turquía y del Oriente Próximo. En Jericó, los cráneos se emplastaban con yeso para recrear facciones del rostro humano.

Es probable que las cabezas separadas fuesen las de personajes notables, quizá literalmente “cabezas” de familia o de linaje. De ahí el enorme interés de haber encontrado cráneos de ambos sexos puestos en círculo y conservados por igual: ello sugiere que la estirpe o el parentesco seguía tanto por la línea femenina como por la masculina.

Llegamos a una conclusión similar si consideramos otro aspecto de los enterramientos. La mayoría de los 62 cuerpos enterrados en el edificio que antes mencioné se encontraban bajo espacios situados alrededor de la estancia principal. Una plataforma inicialmente utilizada para la sepultura habría quedado en desuso. Es posible que este cambio de ubicación estuviera relacionado con la muerte de un determinado individuo (el último en enterrarse en aquel lugar, por tanto). Los cadáveres que ocupan esta posición determinante corresponden, por igual, a varones y mujeres.

Para acotar diferencias sociales, los arqueólogos acostumbran examinar la disposición de las tumbas y los artefactos que les acompañan. Había que averiguar, pues, si los varones se enterraban en una parte de la estancia y las mujeres en otro, si aquéllos se encuentran echados del lado izquierdo y éstas del derecho, si ellos orientados en una dirección y ellas en otra, si determinados objetos se hallaban en tumbas masculinas y otros peculiares en las femeninas. Naomi Hamilton, de la Universidad de Edimburgo, se encargó de buscar posibles patrones, pero no logró establecer pauta alguna. Lo cual nos hace pensar en una sociedad en la que el sexo importaba muy poco o nada en la asignación de roles sociales.

Tareas domésticas

Los enterramientos denotan igualdad. ¿Ocurre lo mismo con el uso de la vivienda? La investigación contemporánea de sociedades pequeñas y no occidentales suele llegar a una misma conclusión: los hombres habrían fabricado los útiles líticos, dejando para las mujeres los cacharros, con los quehaceres culinarios. Pero esta hipótesis no puede generalizarse; abundan los ejemplos etnográficos en los que tales papeles aparecen invertidos. Admitamos por un momento que pueda haber existido en Çatalhöyük alguna división sexual del trabajo. En cada domicilio hay un hogar u horno. Alrededor de éste encontramos grandes acumulaciones de restos cenicientos procedentes de la quema de los troncos, así como restos de la cocción y procesamiento de cereales. Ante esa situación, podríamos deducir que el área en torno al hogar se destinaba a la preparación de la comida y pertenecía principalmente al dominio de la mujer. Una hipótesis que vendría avalada por la ubicación de los enterramientos de neonatos, a menudo en la proximidad del horno.



4. LOS CUERPOS de los miembros fallecidos de la familia, como el de este niño de nueve meses, se enterraban recostados de un lado. Introducidos en una cesta o envueltos en una estera, se los inhumaba bajo el suelo del habitáculo y las plataformas para dormir. El humo de los hornos y la cal que cubría el suelo amortiguarían el hedor de la putrefacción.

Pero entre los residuos cenicientos aparecen también grandes cantidades de esquirlas de obsidiana, mineral que se tallaba y perforaba para fabricar útiles líticos. La obsidiana se traía de Capadocia y se dejaba bajo el suelo, cerca del horno, hasta que se sacaban sus trozos para convertirlos en útiles. El comercio y la producción de útiles son a menudo competencia de los hombres. Si sucedió así en Çatalhöyük, no parece que la transformación de la obsidiana en herramientas tuviese lugar lejos del centro de la actividad doméstica. Fueran hombres o mujeres quienes tallaban la piedra, lo cierto es que en ninguno de los niveles excavados hasta la fecha hallamos indicios de división sexual de roles y tareas.

Arte y simbolismo

Hasta aquí, el cuadro parece coherente. Cuando examinamos la vida

diaria de aquellos pobladores (dieta, trabajos, y enterramientos) encontramos pocas pruebas que revelen una clara separación entre hombres y mujeres. Ninguna señal que abone la hipótesis del patriarcado o la del matriarcado.

En el ámbito del arte y las representaciones simbólicas, en cambio, la situación se torna distinta. Las esferas de influencia aparecen diferenciadas. Consideremos primero a los hombres. Las pinturas se concentran en motivos masculinos. En efecto, la ausencia de figuras femeninas contrasta con la frecuencia de las masculinas, a menudo vestidas con pieles de leopardo, cazando o domando animales salvajes. La barba que lucen algunas de estas imágenes indica, inconfundiblemente, que se trata de hombres.

Gran parte de este arte tiende a resaltar lo masculino. Está lleno de representaciones de animales salvajes, especialmente machos (por ejemplo, toros y ciervos con el pene erecto). La mayoría de las numerosas testas de animales fijadas en las paredes de las casas corresponden a toros salvajes y moruecos. El carácter masculino de esos motivos tiene una larga tradición en Anatolia. Las excavaciones realizadas en Göbekli, un yacimiento más antiguo del sudeste de Turquía, han sacado a la luz imágenes espléndidas de animales salvajes, en muchos casos con el pene erecto, así como falos pétreos en los aledaños del yacimiento.

Nerissa Russell, de la Universidad de Cornell, y Louise Martin, del Colegio Universitario de Londres, han identificado en Çatalhöyük concentraciones de huesos de grandes animales salvajes, especialmente toros. Estos depósitos, que contienen mayor proporción de huesos de toro que de restos de comida habitual, parecen ser los remanentes de algún banquete. Las abundantes pinturas que representan grupos de hombres y toros podrían conmemorar tales festines u otros rituales, propósito que podrían cumplir también las cabezas de toros y de otros animales salvajes que aparecen en las casas enyesados y pintados.

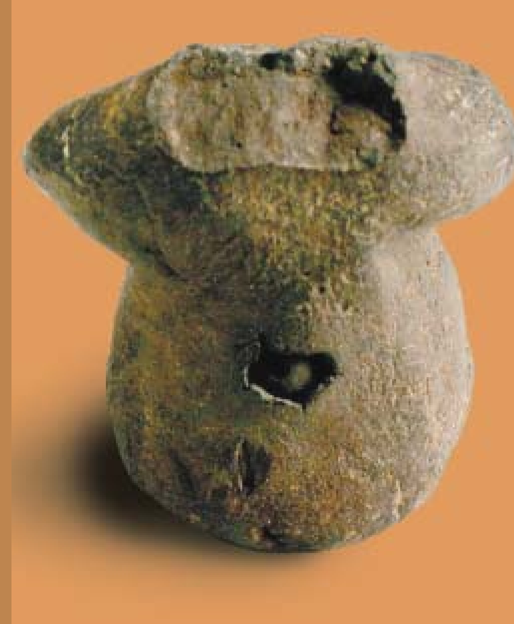
Sin embargo, no olvidemos que el análisis isotópico de los restos humanos indica que no había diferencias en las dietas de los dos sexos. Por tanto, en aquellos festines mujeres y hombres compartían la misma comida. La división sexual sólo se observa en el *arte* que describe la caza y dichos banquetes.

¿Qué decir, pues, de la figura femenina, poderosa, sedente sobre leopardos? A buen seguro, refleja una imagen vigorosa de las mujeres. Idea que viene respaldada por un hallazgo reciente en Çatalhöyük. Se trata de una figurita femenina, muy peculiar, que porta incrustada en la espalda la semilla de una planta silvestre. Esta conexión entre las mujeres y las plantas resulta evidente también en el lugar donde se desenterró la famosa "diosa" sedente: un granero. Agreguemos que en las escasas pinturas que representan mujeres, las muestran recolectando plantas.

Pero, fuera de estos ejemplos escuetos, en general el arte y el simbolismo no destacan, si no niegan, la importancia de la agricultura. Repletos de símbolos, en muchos hogares apenas puede uno moverse sin topar con alguna cabeza de toro o su representación pictórica. En los almacenes de grano, en cambio, no encontramos ornamento simbólico alguno. Los cacharros domésticos carecen de decoración, lo mismo que los recipientes donde se guardaban los cereales. Todo lo referente a las plantas y a la agricultura resulta marginal en el arte y el simbolismo. Los hallazgos artísticos sugieren, pues, que aquel mundo estaba dividido en dos: uno dominado por los hombres y sus actividades, entre ellas la caza y los animales salvajes, y otro, menos representado, que incluía mujeres y plantas.

La situación resultaba mucho más compleja de lo que esa simple partición da a entender. Hemos de prestar atención, además, a la evolución experimentada por la sociedad, a tenor de lo que se nos revela en los distintos niveles de ocupación. Las figuritas de mujeres obesas (sobre todo, la "diosa" hallada en un granero, así como la mujer de la semilla incrustada) proceden de los niveles superiores, entre el tercero y el cuarto de un total de 18. Aunque la agricultura y la domesticación de plantas existían desde hacía va-





5. EL RECIENTE HALLAZGO de una figurita de sólo 2,8 centímetros de altura, con una semilla incrustada en la espalda, sugiere que las mujeres desempeñaron un importante papel en la incipiente domesticación de plantas en Çatalhöyük.

ÇATALHÖYÜK RESEARCH PROJECT



JAMES MELLAART

6. LA PINTURA de un enorme toro rojo (el extinguido uro, *Bos primigenius*) ocupaba la pared de una casa. El tamaño del animal, más de 1,85 metros de longitud, y la desproporcionada pequeñez de las figuras masculinas que lo rodean sugieren el terror que el animal inspiraba. El mural puede conmemorar un festín u otro rito.

rios siglos, determinados aspectos clave de la vida social, como los revelados en el arte y en los restos de festines, giraban en torno a los animales salvajes. En los niveles superiores parecen ganar protagonismo los productos agrícolas, junto con los ritos asociados a las cosechas. En el arte de las figuritas en particular, la mujer se encuentra vinculada al cultivo de plantas.

Esta prominencia de la agricultura y el papel que en ella desempeñaban las mujeres forman parte de una amplia serie de cambios observados en los últimos estratos de Çatalhöyük. En particular, hallamos hornos de gran tamaño fuera de las casas, en los patios, lo que podría indicar cierto grado de especialización en la producción de los alimentos. En los estratos superiores aumenta el dominio de la manufactura de útiles líticos y productos de alfarería. Aparece también la estampación de sellos, que sugiere un mayor sentido de la propiedad. En este contexto general, la división sexual adquiere mayor nitidez; ello se pone de manifiesto, en particular, en un dominio específicamente femenino: el del cultivo de plantas comestibles.

Así pues, lo que vemos en Çatalhöyük no corresponde a un patriarcado ni a un matriarcado, sino a una sociedad más compleja e interesante: una comunidad en la que, en muchos aspectos, ser hombre o mujer no determinaba la vida que se podía llevar. Ambos sexos gozaban de diversas posiciones sociales y ejercían una serie de funciones, desde fabricar útiles para moler el grano y cocer el pan hasta gobernar la casa y la familia. Según muestran las pinturas, los hombres dominaban en el ámbito de los festines. Pero no existe señal alguna de que tuvieran influencia decisiva en otros aspectos de la vida. En cualquier caso, ese dominio del varón quedó en entredicho cuando, varios milenios después de la domesticación de los cereales, la agricultura devino el centro de la vida de la comunidad. En ese instante, mujeres y plantas aparecen entrelazadas en el arte, mas, incluso entonces, queda en el aire la cuestión de si tal predominio de la mujer en las labores agrícolas repercutió sobre otras vertientes de la vida.

Nuestra información de los niveles superiores, donde encontramos las figurillas femeninas y los hornos de mayor tamaño, es harto menor que lo que conocemos sobre los inferiores, de donde se extrajeron los huesos y dientes analizados. Habrá que esperar a las próximas campañas de excavación de los niveles superiores, para desentrañar los procesos sociales que condujeron hasta la creación de esas imágenes de mujeres poderosas.

El autor

Ian Hodder, formado en Cambridge, dirige el departamento de antropología cultural y social de la Universidad de Stanford. Autor de varios libros sobre arqueología, es el responsable de la investigación y las excavaciones del yacimiento turco de Çatalhöyük.

Bibliografía complementaria

A NEOLITHIC CITY IN TURKEY. James Mellaart en *Scientific American*, vol. 210, n.º 4, págs. 94-104; abril de 1964.

ÇATAL HÜYÜK: A NEOLITHIC TOWN IN ANATOLIA. James Mellaart. McGraw-Hill, 1967.

ON THE SURFACE: ÇATALHÖYÜK 1993-95. Dirigido por Ian Hodder. The McDonald Institute for Archeological Research, University of Cambridge y British Institute of Archaeology de Ankara, 1996.

WHY SETTLE DOWN? THE MYSTERY OF COMMUNITIES. Michael Balter en *Science*, vol. 282, págs. 1442-1445; 20 de noviembre, 1998.

A TALE OF TWO ARCHAEOLOGISTS. Robert Kunzig en *Discover*, vol. 20, n.º 5, págs. 84-92; mayo de 1999.



Atomos del espacio y del tiempo

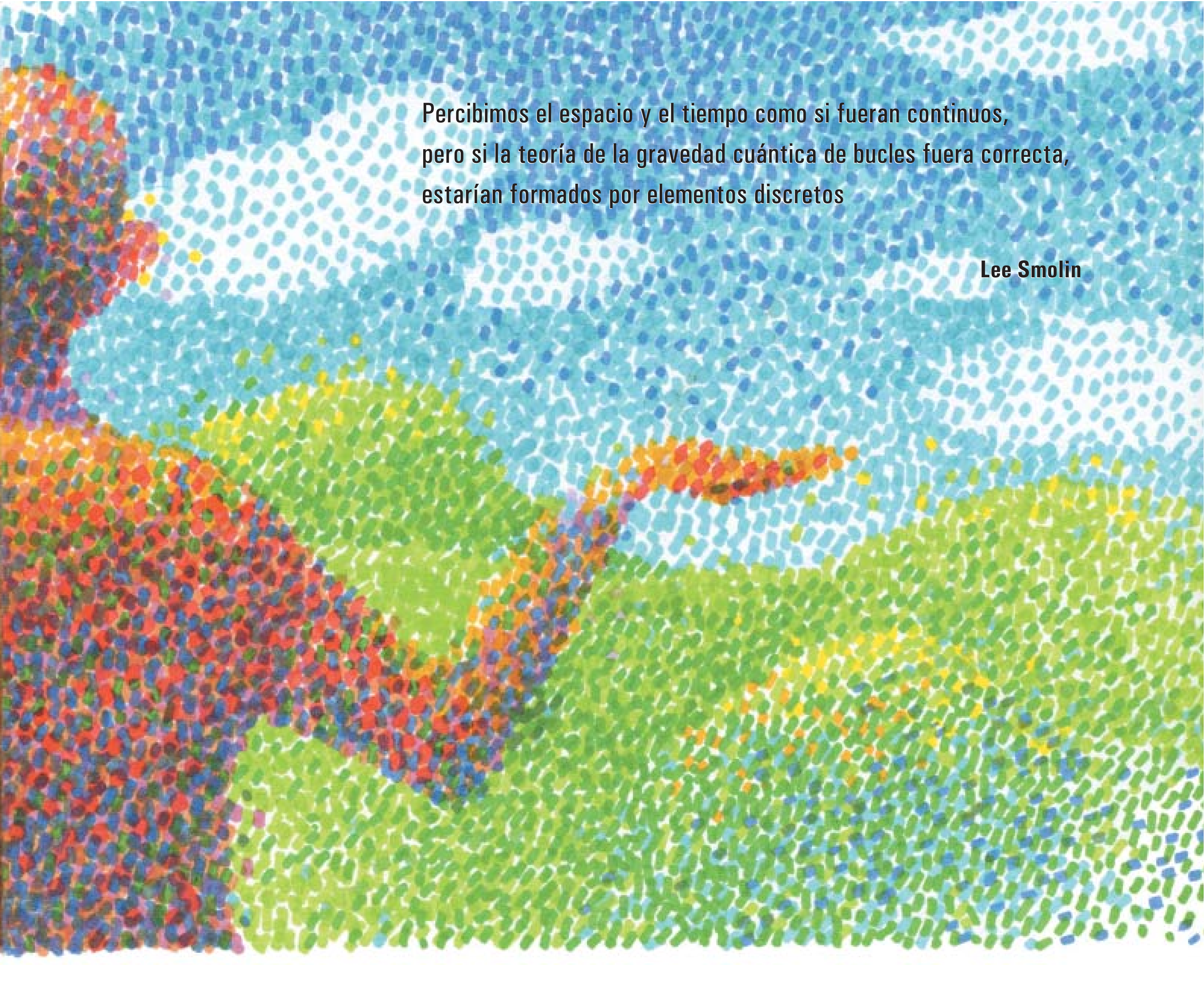
Apenas si ha pasado un siglo desde los días en que casi nadie, científico o profano, negara la continuidad de la materia. Si bien se había venido conjeturando desde la Antigüedad que, partiendo y partiendo, se llegaría a unos componentes indivisibles y minúsculos, pocos pensaban que alguna vez se demostraría su existencia. Hoy hemos tomado imágenes de átomos sueltos y estudiado las partículas que los forman. La granularidad de la materia se da por consabida.

En los últimos tiempos, físicos y matemáticos se han preguntado si el espacio no estará también formado por piezas. ¿Es continuo, tal y como aprendimos en la escuela, o recuerda más bien a una tela, que se teje con fibras sueltas? Si pudiéramos analizar el espacio a escalas suficientemente pequeñas, ¿veríamos "átomos" de espacio, irreducibles pedazos de volumen que no se podrían descomponer en nada menor? ¿Y el tiempo? ¿Cambia continuamente la naturaleza, o discurre mediante series de muy pequeños pasos, como los ordenadores?

Los últimos 16 años han visto grandes progresos en estas cuestiones. Una teoría, la "gravedad cuántica de bucles", predice que el espacio y el tiempo se componen de piezas. Gracias a ella, hemos profundizado en nuestra comprensión de paradójicos fenómenos relacionados con los agujeros negros y la gran explosión (el "big bang"). Lo mejor es que cabe verificarla; predice resultados de experimentos, factibles en un futuro próximo, que detectarán los átomos del espacio, si realmente existen.

Los cuantos

Enunciamos la teoría de la gravedad cuántica de bucles mientras batallábamos con un persistente problema de la física: ¿es posible una teoría cuántica de la gravedad? Para explicar por qué se trata de una cuestión importante —y exponer qué tiene que ver con la granularidad del espacio y del tiempo—, conviene introducir primero la teoría cuántica y la teoría de la gravedad. La formulación de la mecánica cuántica en el primer cuarto del siglo XX guardó estrecha relación



Percibimos el espacio y el tiempo como si fueran continuos, pero si la teoría de la gravedad cuántica de bucles fuera correcta, estarían formados por elementos discretos

Lee Smolin

DUSAN PETRICIC

con la confirmación de que la materia se compone de átomos. Sus ecuaciones imponen que ciertas magnitudes, así la energía de un átomo, puedan tomar determinados valores discretos. La teoría cuántica predice con éxito las propiedades de los átomos, de las partículas elementales y de las fuerzas que los unen. Ninguna teoría ha tenido más éxito que la teoría cuántica. En ella se fundamentan la química, la física atómica y subatómica, la electrónica e incluso la biología.

En los mismos decenios en que se formuló la mecánica cuántica, Albert Einstein construyó su teoría general de la relatividad, una teoría de la gravedad. La fuerza gravitatoria surge en ella como una consecuencia de que la materia curve el espacio y el tiempo (que juntos forman el "espaciotiempo"). Como lejana analogía valga una lámina de goma donde una canica rueda cerca de una bola pesada. La bola podría representar el Sol; la canica, la Tierra; la lámina, el espacio. La bola hunde la goma. La pendiente de la oquedad desvía la canica hacia la bola mayor. Parece que alguna fuerza —la gravedad— la atrajera hacia esa dirección. De manera similar, cualquier pedazo de materia o cualquier concentración de energía distorsionan la geometría del espaciotiempo; provoca así que otras partículas y rayos de luz se desvíen hacia ellos. A ese fenómeno lo llamamos gravedad.

Los experimentos han ratificado tanto la teoría cuántica como la teoría de la relatividad general de Einstein de la manera más impresionante; a cada una por su lado. Ningún experimento ha explorado el régimen donde ambas predicen, a la vez, efectos significativos. El problema estriba en que los efectos cuánticos son más prominentes a distancias pequeñas, mientras que los de la relatividad general requieren grandes masas. Se necesitan circunstancias extraordinarias para combinar ambas condiciones.

A esta ausencia de datos experimentales se añade un enorme problema conceptual: la teoría de la relatividad general de Einstein es completamente clásica; le es ajena la mecánica cuántica. A fin de que la física, en conjunto, sea lógicamente coherente, debiera haber una teoría que una la mecánica cuántica y la relatividad ge-

neral. A esta muy buscada teoría se la conoce como gravedad cuántica. La relatividad general opera en la geometría del espaciotiempo: una teoría cuántica de la gravedad deberá ser, además, una teoría cuántica del espaciotiempo.

No andamos escasos de procedimientos matemáticos para convertir una teoría clásica en cuántica. Muchos se han esforzado en aplicarlos a la relatividad general, pero los primeros resultados fueron desalentadores. Los cálculos de los decenios de 1960 y 1970 parecieron indicar que la teoría cuántica y la relatividad general no podían combinarse. En consecuencia, parecía que se necesitaba algo fundamentalmente nuevo, postulados o principios adicionales no incluidos en la teoría cuántica ni en la relatividad general, nuevas partículas o campos, o incluso entes hasta ahora desconocidos. Quizá con las oportunas adiciones o una nueva estructura matemática podría desarrollarse una teoría de tipo cuántico que se aproximase a la relatividad general en el régimen no cuántico. Para que no echase a perder las exitosas predicciones de la teoría cuántica y de la relatividad general, lo que de inaudito contuviera la teoría completa debería permanecer oculto en los experimentos, excepto en las circunstancias extraordinarias donde se espera que la teoría cuántica y la relatividad general tengan efectos grandes a la vez. La teoría de twistores, la geometría no conmutativa y la supergravedad constituyen algunos de los enfoques con que se intenta satisfacer ese desiderátum.

Un enfoque muy difundido es la teoría de cuerdas. Establece que el espacio tiene seis o siete dimensiones —hasta ahora ninguna observada—, aparte de las tres que nos son familiares. También predice la existencia de nuevas partículas elementales y fuerzas, de las que hasta ahora no hay indicios. Algunos creen que está subsumida en una nueva teoría, la teoría M [*véase* “La teoría M”, por Michael J. Duff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1998], pero no hay una definición precisa de esta supuesta teoría. Por eso abundan quienes creen que deben estudiarse alternativas. Ninguna tan desarrollada como nuestra teoría de la gravedad cuántica de bucles.

El resquicio de la continuidad

Hacia mitad de los años ochenta, Abhay Ashtekar, ahora en la Universidad estatal de Pennsylvania, Ted Jacobson, de la de Maryland, Carlo Rovelli, hoy en la Universidad del Mediterráneo en Marsella, y yo mismo decidimos reconsiderar la posibilidad de conjugar la mecánica cuántica y la relatividad general por medio de los procedimientos comunes. Sabíamos que los resultados negativos de los años setenta tenían un punto débil. Aquellos cálculos atribuían a la geometría del espacio lo que, antes del descubrimiento de los átomos, se pensaba de la materia: que era continua, por muy fino que fuese el detalle con que la examináramos. Algunos de nuestros maestros y mentores habían apuntado que si esta hipótesis era incorrecta, los viejos cálculos carecerían de fiabilidad.



1. EL ESPACIO está tejido con distintas hebras.

DUSAN PETRICIC

Así pues, buscamos una manera de calcular que no presupusiese la suave continuidad del espacio. Insistimos en no añadir ninguna hipótesis adicional a los principios bien comprobados experimentalmente de la relatividad general y la teoría cuántica. En particular, mantuvimos dos principios clave de la relatividad general en la raíz misma de nuestros cálculos.

El primero, la independencia del fondo. Este principio establece que la geometría del espaciotiempo no está fijada. Al contrario: evoluciona, es dinámica. Para encontrar la geometría, se tienen que resolver ciertas ecuaciones que incluyen todos los efectos de la materia y la energía. La teoría de cuerdas, tal como se formula actualmente, no es independiente del fondo; las ecuaciones que describen las cuerdas se formulan en un espaciotiempo clásico (es decir, no cuántico) predeterminado.

El segundo principio, la “invariancia difeomórfica”, guarda estrecha relación con la independencia del fondo. Este principio establece que, al revés de lo que sucedía en las teorías anteriores a la relatividad general, se es libre de elegir cual-

Resumen/Espaciotiempo cuántico

- El conocimiento de la estructura del espacio a las menores escalas requiere una teoría cuántica de la gravedad. Según la teoría general de la relatividad de Einstein, la gravedad consiste en la deformación del espacio y el tiempo; de ahí el porqué de esa necesidad.
- La combinación de los principios fundamentales de la mecánica cuántica y de la relatividad general conduce a la teoría de la “gravedad cuántica de bucles”. Los estados cuánticos del espacio que permite están ligados a unos diagramas de líneas y nodos, las redes de espín. El espaciotiempo cuántico corresponde a otros diagramas similares, las espumas de espín.
- La gravedad cuántica de bucles predice que el espacio está formado por granos, el menor de los cuales mide el cubo de la longitud de Planck, o 10^{-99} centímetros cúbicos. El tiempo transcurre a lapsos del orden del tiempo de Planck, o 10^{-43} segundos. Los efectos de esta estructura discreta quizás afloren en experimentos de un próximo futuro.

quier conjunto de coordenadas para representar el espaciotiempo y expresar las ecuaciones. Un punto del espaciotiempo sólo está definido por lo que físicamente sucede en él, no por su localización según algún conjunto de coordenadas especial (no hay sistemas de coordenadas especiales). La invariancia difeomórfica, muy potente, adquiere una importancia fundamental en la relatividad general.

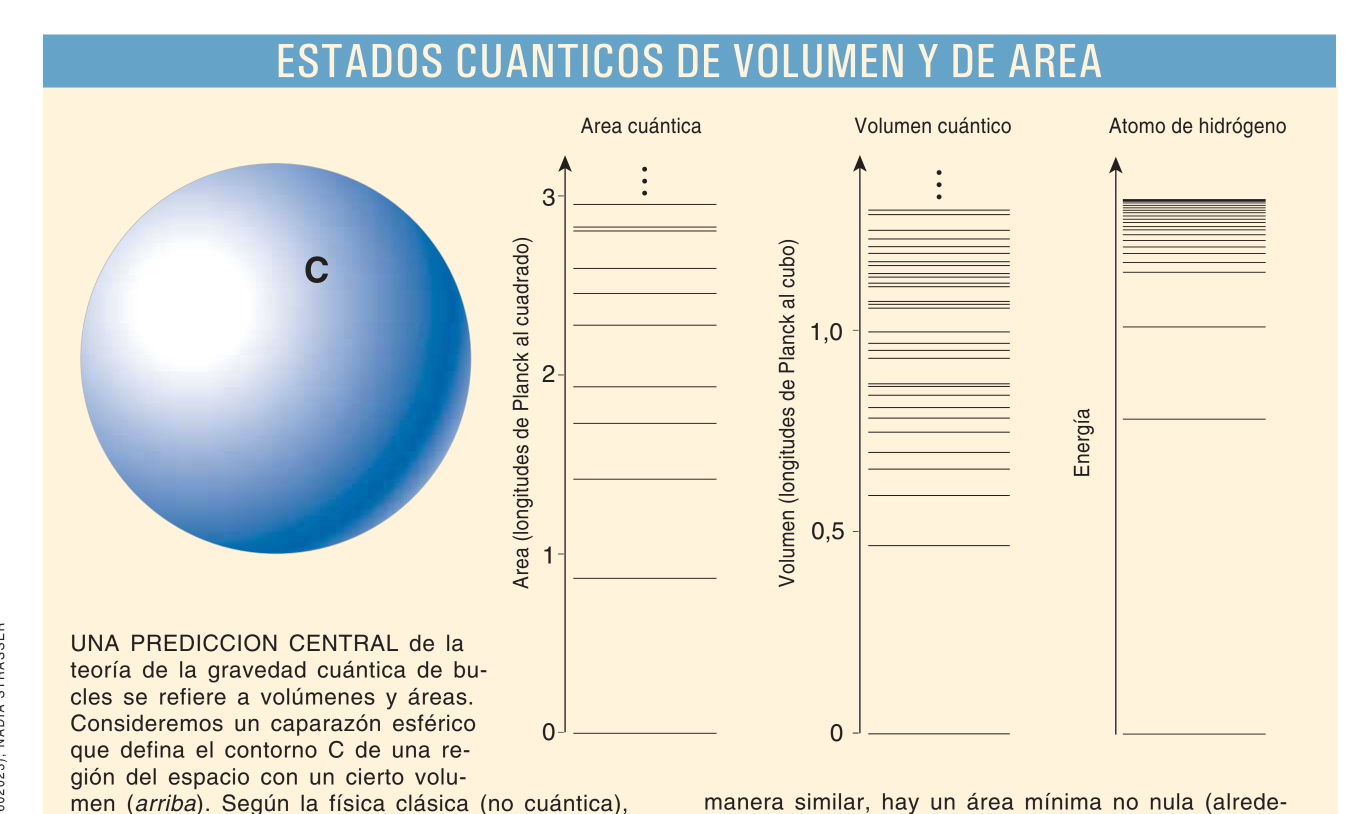
Combinando cuidadosamente estos dos principios con los procedimientos usuales de la mecánica cuántica, hemos desarrollado un lenguaje matemático que nos ha permitido calcular si el espacio es continuo o discreto. El resultado desveló, para nuestra satisfacción, que el espacio está cuantificado. Habíamos sentado los cimientos de nuestra teoría cuántica de la gravedad de bucles. El término "bucle" se debe a que algunos cálculos de la teoría involucran pequeños bucles (no en el sentido literal de tirabuzón, sino con la connotación de vuelta al punto de partida) dibujados en el espaciotiempo.

Los cálculos se han reproducido aplicando métodos diferentes. De entonces acá, el estudio de la gravedad cuántica de bucles se ha convertido en un fértil campo de investigación, con numerosas aportaciones de físicos de todo el mundo; este esfuerzo conjunto nos permite confiar en la representación del espaciotiempo que voy a describir.

La nuestra es una teoría cuántica de la estructura del espaciotiempo a las menores distancias a fin de explicar cómo actúa, hemos de considerar qué predice para regiones o volúmenes muy pequeños. Tratándose de física cuántica, es esencial especificar con precisión qué magnitudes físicas se van a medir. Para ello, consideremos una región cualquiera, definida por un contorno C. El contorno vendrá definido, a su vez, por materia, por un caparazón de hierro, por ejemplo, o por la geometría del propio espaciotiempo; sería éste el caso del horizonte de sucesos de un agujero negro (una superficie de cuyo interior no puede escapar, insuperable la gravedad del agujero, ni la luz).

¿Qué sucede si medimos el volumen de la región? ¿Cuáles son los posibles resultados permitidos a la vez por la teoría cuántica y la invariancia difeomórfica? Si la geometría del espacio es continua, la región podría tener cualquier tamaño y la medición darnos cualquier número real positivo; en particular, uno tan cercano a cero como se quiera. Pero si la geometría es granular, la medición sólo podrá pertenecer a un conjunto de números discreto y no resultará en ningún caso menor que un determinado volumen mínimo. Con la energía de los electrones que orbitan en torno a un núcleo atómico ocurre algo parecido. La mecánica clásica predice que puede ser cualquiera, pero la mecánica cuántica sólo permite determinados valores; los interme-

ESTADOS CUANTICOS DE VOLUMEN Y DE AREA



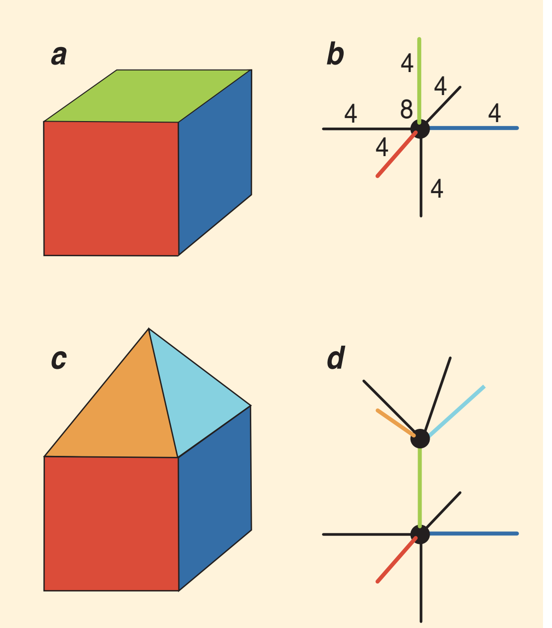
UNA PREDICCION CENTRAL de la teoría de la gravedad cuántica de bucles se refiere a volúmenes y áreas. Consideremos un caparazón esférico que defina el contorno C de una región del espacio con un cierto volumen (*arriba*). Según la física clásica (no cuántica), éste podría valer cualquier número real positivo. La teoría de la gravedad cuántica de bucles dice, sin embargo, que hay un volumen mínimo absoluto no nulo (del orden de una longitud de Planck al cubo, o 10^{-99} centímetros cúbicos) y restringe los volúmenes mayores a una serie discreta de números. De manera similar, hay un área mínima no nula (alrededor de una longitud de Planck al cuadrado, o 10^{-66} centímetros cuadrados) y una serie discreta de áreas mayores permitidas. El espectro discreto de áreas (*izquierda*) y volúmenes (*centro*) cuánticos permitidos recuerda a los niveles cuánticos de energía discretos de un átomo de hidrógeno (*derecha*).

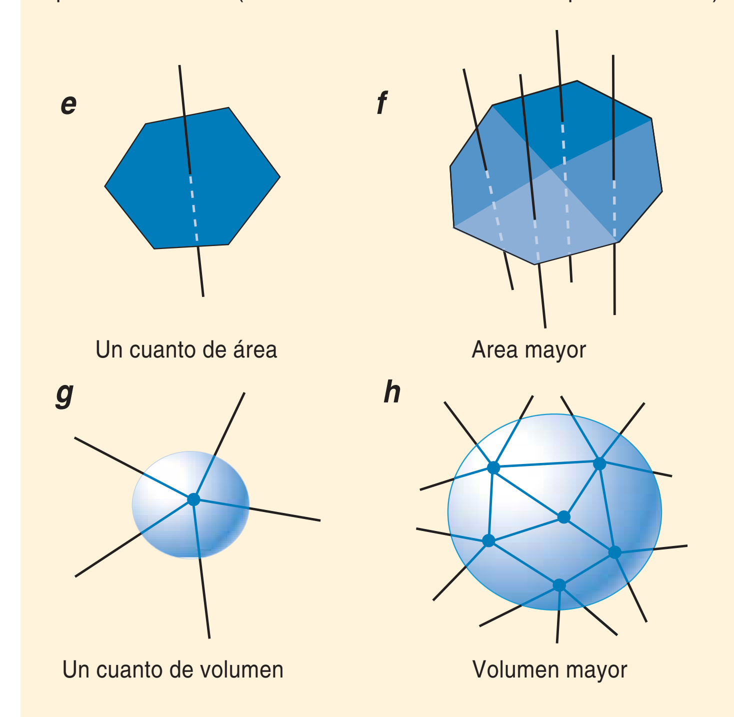
FUENTE: DATOS DE AREA Y VOLUMEN DE ROBERTO DE PIETRI Y CARLO ROVELLI (http://arxiv.org/abs/gr-qc/9602023); NADIA STRASSER

VISUALIZACION DE LOS ESTADOS CUANTICOS DE VOLUMEN

LA GRAVEDAD CUANTICA de bucles representa, a una escala minúscula, los estados cuánticos del espacio mediante unos diagramas, las redes de espín. Algunos corresponden a volúmenes poliédricos. Un cubo (*a*) consiste en un volumen limitado por seis caras cuadradas. La correspondiente red de espín (*b*) tiene un punto, o nodo, que representa el volumen, y seis líneas que representan las seis caras. La red de espín completa tiene un número en el nodo que indica el volumen del cubo y un número en cada línea que indica el área de la correspondiente cara. Aquí el volumen es de ocho longitudes de Planck al cubo; cada una de las caras es de cuatro longitudes de Planck al cuadrado. (Las reglas de la gravedad cuántica de bucles restringen los volúmenes y las áreas permitidos a determinados valores: sólo se admiten ciertas combinaciones de números en las líneas y nodos.)

Si se pone una pirámide sobre la cara superior del cubo (*c*), la línea que representa dicha cara en la red de espín conectará el nodo del cubo con el nodo de la pirámide (*d*). Las líneas correspondientes a las cuatro caras vistas de la pirámide y las cinco caras vistas del cubo saldrían de sus respectivos nodos. (Los números se han omitido por sencillez.)





En una red de espín, un cuanto de área se representa por medio de una sola línea (*e*), mientras que a un área formada por muchos cuantos se le asignan muchas líneas (*f*). De manera similar, a un cuanto de volumen le corresponde un nodo (*g*); a un volumen mayor, muchos (*h*). Si tenemos una región del espacio definida por una corteza esférica, su volumen valdrá la suma de todos los nodos interiores y su área superficial vendrá dada por la suma de las líneas que la atraviesan.

Las redes de espín vienen antes que los poliedros: cualquier disposición de poliedros puede representarse con una red de espín, pero algunas redes de espín válidas representan combinaciones de volúmenes y de áreas que no pueden dibujarse como poliedros. Aparecen cuando el espacio se curva por un intenso campo gravitacional o en el transcurso de fluctuaciones cuánticas de la geometría del espacio a la escala de Planck.

NADIA STRASSER

dios, no se dan nunca. Entre lo uno y lo otro viene a haber la misma diferencia que entre medir un flujo continuo (el agua tal y como se la concebía en el siglo XIX) y un conjunto que puede contarse (los átomos de esa agua).

La teoría de la gravedad cuántica de bucles predice que en el espacio ocurre como con los átomos: el resultado de medir un volumen habrá de pertenecer a un conjunto discreto de números. El volumen consta de piezas. Otra cantidad que podemos medir es el área del contorno C. De nuevo los cálculos de la teoría dan un resultado inequívoco: también el área de la superficie es discreta. En otras palabras, el espacio no es continuo; lo componen determinadas unidades cuantizadas de área y volumen.

Los posibles valores del volumen y del área se miden en múltiplos de una cantidad, la longitud de Planck. Se halla ésta relacionada con la intensidad de la gravedad, el tamaño de los cuantos y la velocidad de la luz. Mide la escala en que la geometría del espacio deja de ser continua. Es muy pequeña: 10^{-33} centímetros. La mínima área posible no nula es el cuadrado de la longitud de Planck, 10^{-66} cm^2. El mínimo volumen no nulo, el cubo de la longitud de Planck, 10^{-99} cm^3. Así, la teoría predice que hay unos 10^{99} átomos de volumen en cada centímetro cúbico de espacio. El cuanto de volumen es tan pequeño, que hay más en un centímetro cúbico que centí-

metros cúbicos en el universo visible (10^{85}).

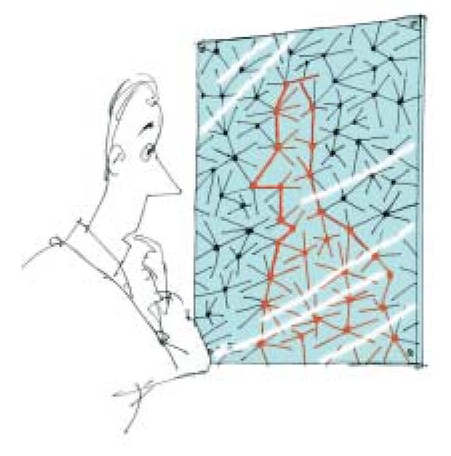
Redes de espín

¿Qué más nos dice nuestra teoría acerca del espaciotiempo? Ante todo, ¿cómo son estos estados cuánticos de volumen y de área? ¿Forman el espacio muchos pequeños cubos o esferas? No es tan simple. Pero sí podemos dibujar diagramas que representan los estados cuánticos de volumen y de área. Para los que trabajamos en este campo, la belleza de esos diagramas nace de su nexo con una elegante rama de las matemáticas.

Imaginemos un trozo cúbico de espacio. En nuestros diagramas, representaríamos ese cubo como un punto (el volumen) del que salen seis líneas (cada una de las caras del cubo). Hemos de escribir un número junto al punto, a fin de especificar la cantidad de volumen, y un número en cada línea que dé el área de la cara que la línea representa.

Supongamos ahora que ponemos una pirámide encima del cubo. Estos dos poliedros, que tienen una cara en común, se representarían como dos puntos (dos volúmenes) conectados por una de las líneas (la cara que une los dos volúmenes). El cubo tiene otras cinco caras (cinco líneas salientes) y la pirámide, cuatro (cuatro líneas salientes). Está claro cómo se representarían combinaciones más complicadas de otros poliedros: cada volumen poliédrico se convierte en un punto, o nodo, y las caras planas, en líneas, que se unen a los nodos como las caras unen los poliedros entre sí. A estos diagramas de líneas se les llama "grafos".

En nuestra teoría olvidamos los dibujos de poliedros y nos quedamos sólo con los grafos. Las matemáticas que describen los estados cuánticos de volumen y de área nos dan un conjunto de reglas acerca de cómo pueden conectarse los nodos y las líneas, sobre qué números pueden adjuntarse a un diagrama, y sobre dónde hacerlo. Cada estado cuántico corresponde a uno de estos grafos y cada grafo que obedezca las reglas corresponde a un estado cuántico. Los grafos constituyen un compendio adecuado de los posibles estados cuánticos del



2. LA MATERIA RESIDE en los nodos de la red de espín.

DUSAN PETRICIC

espacio. (Las matemáticas, los detalles, de los estados cuánticos son demasiado complicados para abordarlos aquí; hemos de conformarnos con mostrar algunos de los diagramas.)

Los grafos representan los estados cuánticos mejor que los poliedros. En particular, las extrañas conexiones de algunos grafos no pueden convertirse en una ordenada imagen de poliedros. Por ejemplo: siempre que el espacio esté curvado, los poliedros no se ajustarán adecuadamente en ningún dibujo que podamos hacer; en cambio, nos será fácil trazar un grafo. Más aún: a partir de un grafo, calcularemos cuánto se distorsiona el espacio. La distorsión del espacio produce la gravedad. Los diagramas, pues, constituyen una teoría cuántica de la gravedad.

Por mor de sencillez, a menudo dibujamos los grafos en dos dimensiones, pero es mejor imaginarlos llenando el espacio tridimensional; es lo que representan. Pero aquí hay una trampa conceptual: las líneas y nodos de un grafo no residen en una determinada localización del espacio. Cada grafo se define sólo por la manera en que sus partes se conectan entre sí y por su relación con contornos bien definidos, como el contorno C. El espacio continuo y tridimensional donde, según la imaginación, moran los grafos *no existe* como ente aparte. Sólo existen líneas y nodos; *son* espacio, y sus conexiones definen la geometría de éste.

Esos grafos reciben el nombre de redes de espín, debido a que sus números corresponden a unas magnitudes conocidas como espines. Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, propuso, hará unos treinta años, que las redes de espín podían desempeñar una función en las teorías de la gravedad cuántica. Nos sentimos muy complacidos cuando, en 1994, encontramos cálculos precisos que confirmaban su intuición. Los lectores familiarizados con los diagramas de Feynman deben observar que nuestras redes de espín *no* son diagramas de Feynman, pese a su parecido superficial. Los diagramas de Feynman representan interacciones cuánticas entre partículas que evolucionan de un estado cuántico a otro. Nuestros diagramas representan estados cuánticos fijos de volúmenes y áreas espaciales.

Los nodos y aristas individuales de los diagramas representan regiones espaciales pequeñísimas: un nodo, un volumen de aproximadamente una longitud de Planck al cubo; una línea, un área de alrededor de una longitud de Planck al cuadrado. Pero en principio, nada limita el tamaño y complejidad de una red de espín. Si pudiéramos dibujar una imagen detallada del estado cuántico de nuestro universo —la geometría de su espacio, curvada y deformada por la gravitación de las galaxias, de los agujeros negros y de cualquier otra cosa—, obtendríamos una gigantesca red de espín de inimaginable complejidad, con unos 10^{184} nodos.

Estas redes de espín describen la geometría del espacio. Pero, ¿qué hay de la materia y la energía contenida en dicho espacio? ¿Cómo representamos las partículas y los campos que ocupan posiciones y regiones del espacio? Las partículas, así los electrones, corresponden a ciertos tipos de nodos a los que se añaden más rótulos. Los campos, así el electromagnético, se representan añadiendo rótulos a las líneas del grafo. Para representar las partículas y los campos que se desplazan, movemos estos rótulos, paso a paso, por los grafos.

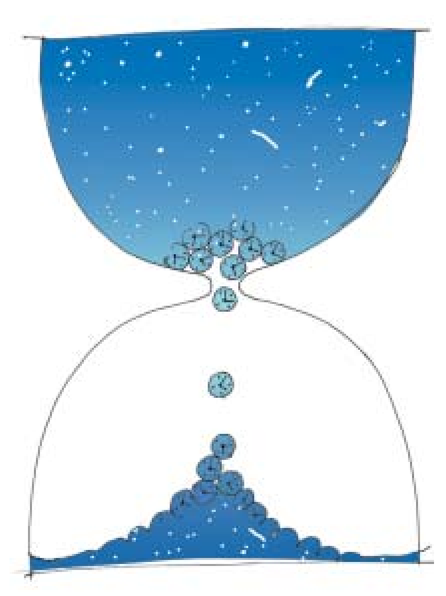
Movimientos y espumas

No sólo se mueven las partículas y los campos. Según la relatividad general, la geometría del espacio cambia con el tiempo. Los pandeos

y pliegues del espacio cambian a medida que la materia y la energía se mueven; lo atraviesan ondas, como olas en un lago [*véase* "Ondas en el espacio-tiempo," por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2002]. En la gravedad cuántica de bucles estos procesos se representan mediante cambios en los grafos, que evolucionan con el tiempo mediante una sucesión de ciertos "movimientos" que modifican su conectividad (en el mismo sentido de operaciones discretas con que se habla de movimientos, por ejemplo, en una partida de ajedrez; en adelante deberá entenderse la palabra así).

La descripción mecanocuántica de un fenómeno comporta calcular las probabilidades de diferentes procesos. Así ocurre también cuando aplicamos la gravedad cuántica de bucles, bien sea a la descripción de partículas y campos que se mueven por las redes de espín, bien a la explicación de la evolución en el tiempo de la propia geometría del espacio. En particular, Thomas Thiemann, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Waterloo (Ontario), ha deducido precisas probabilidades cuánticas para los movimientos de las redes de espín. Con ellas la teoría queda completamente determinada: tenemos así un método bien definido para calcular la probabilidad de cualquier proceso que pueda desarrollarse en un mundo que obedezca las reglas de nuestra teoría. Sólo queda hacer los cálculos y extraer las predicciones de lo que podría observarse en experimentos de una u otra clase.

La relatividad especial y general unen el espacio y el tiempo en un único ente, el espaciotiempo. Las redes de espín que representan el espacio en la gravedad cuántica de bucles acomodan el concepto de espaciotiempo convirtiéndose en "espumas" de espín. Con la adición de otra dimensión —el tiempo— las líneas de las redes de espín se convierten en superficies bidimensionales y los nodos en líneas. Las transiciones en las que las redes de espín cambian (los movimientos mencionados antes) se representan ahora por los nodos donde las líneas se cortan en la espuma. Concebir el espaciotiempo como una espuma de espín



3. EL TIEMPO AVANZA por los discretos tics de innumerables relojes.

DUSAN PETRICIC

ha sido obra de Carlo Rovelli, Mike Reisenberger (ahora en la Universidad de Montevideo), John Barrett, de la Universidad de Nottingham, Louis Crane, de la Universidad estatal de Kansas, John Baez, de la Universidad de California en Riverside, y Fotini Markopoulou, del Instituto Perimeter de Física Teórica.

En la visión espaciotemporal, una instantánea tomada en un momento determinado equivale a rebanar una sección de espaciotiempo. En una espuma de espín se obtiene así una red de espín. Pero caeríamos en un error si nos imagináramos que la rebanada se mueve continuamente, como si el tiempo fluyese sin interrupción. De la misma manera que el espacio se define por la geometría discreta de una red de espín, el tiempo se define por la secuencia de movimientos que reordena la red. El tiempo también se "discretiza". No discurre como un río, sino como el tic-tac de un reloj, con tics y tacs que duran más o menos el tiempo de Planck: 10^{-43} segundos. O, dicho más precisamente, el tiempo fluye en nuestro universo por el tic-tac de innumerables relojes; en cierto sentido, en cada localización de la espuma de espín donde tiene lugar un "movimiento" cuántico hace tic un reloj.

Predicciones y pruebas

He esbozado qué dice la gravedad cuántica de bucles acerca del espacio y del tiempo a la escala de Planck, pero no podemos verificar la teoría directamente examinando el espaciotiempo a distancias tan cortas. ¿Cómo podríamos contrastarla? Deducir la relatividad general clásica como una aproximación de la gravedad cuántica de bucles sería una comprobación importante. En otras palabras, si las redes de espín son como las hebras tejidas de una pieza de tela, cabe preguntarse si resulta posible calcular las propiedades elásticas de una capa de materia promediando sobre miles de hebras. De manera similar, cuando se promedia sobre longitudes muchas veces la de Planck, las redes de espín ¿describen la geometría del espacio y su evolución de suerte que concuerde de forma aproximada con el "paño fino" de la teoría clásica de Einstein? Se trata de un problema difícil, pero no hace mucho se ha progresado en algunos casos; para ciertas configuraciones del material, por así decirlo. Por ejemplo, las ondas gravitacionales de longitud de onda larga que se propagan en un espacio por lo demás plano (no curvado) pueden interpretarse como excitaciones de determinados estados cuánticos descritos por la gravedad cuántica de bucles.

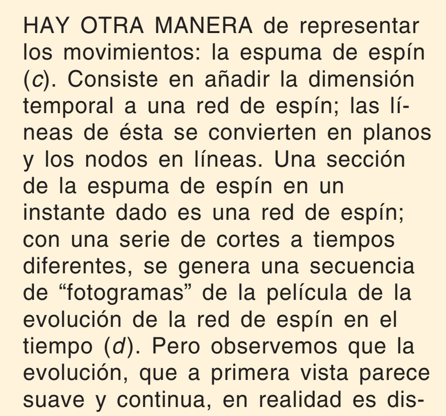
Otra verificación consistiría en descubrir qué enseña la gravedad cuántica de bucles acerca de uno de los misterios más pertinaces de la física gravitacional y la teoría cuántica: la termodinámica de los agujeros negros, en particular su entropía, ligada al grado de desorden. Se han calculado predicciones relativas a la termodinámica del agujero negro gracias a una teoría híbrida, aproximada, que trata la materia de forma mecanicocuántica, pero el espaciotiempo no. Una teoría cuántica de la gravedad completa, como la gravedad cuántica de bucles, tendría que reproducir estas predicciones. En los años setenta Jacob D. Bekenstein, ahora en la Universidad Hebrea de Jerusalén, dedujo que a los agujeros negros se les debe adscribir una entropía proporcional a su área superficial [*véase* "La información en el universo holográfico," por Jacob D. Bekenstein; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2003]. Poco después, Ste-

phen Hawking dedujo que los agujeros negros, especialmente los pequeños, deben emitir radiación. Estas predicciones cuentan entre los más importantes resultados de la física teórica de los últimos 30 años.

Para calcularlas con la gravedad cuántica de bucles, tomamos como contorno C el horizonte de sucesos de un agujero negro. Cuando analizamos la entropía de los estados cuánticos que vienen al caso, obtenemos *precisamente* la predicción de Bekenstein. De manera similar, la teoría reproduce la predicción de Hawking de la radiación del agujero negro. Añade incluso predicciones referidas a la estructura fina de esa radiación; si alguna vez se observa un agujero negro microscópico, se podría comprobarlas estudiando el espectro de la radiación que emitiese. Sin embargo, puede que haya que esperar mucho para ver algo así; no disponemos de los medios técnicos para crear agujeros negros, pequeños o no.

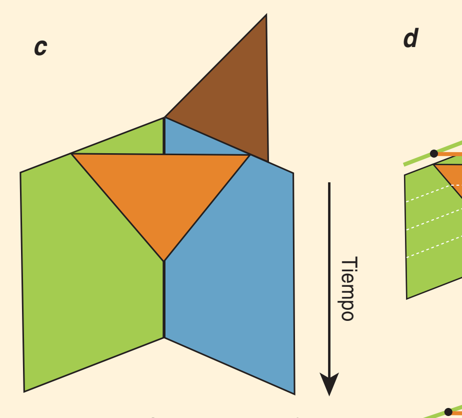
LA EVOLUCION DE LA GEOMETRIA CON EL TIEMPO

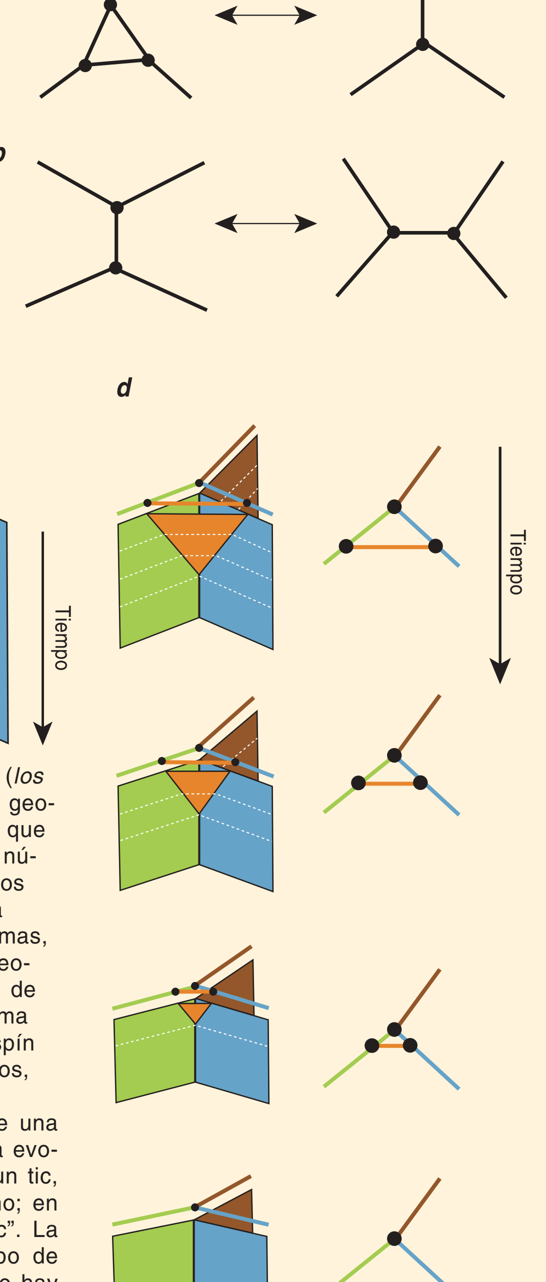
LOS CAMBIOS EN LA FORMA del espacio —los que ocurren cuando la materia y la energía se mueven en su seno y cuando las ondas gravitacionales se propagan por él— se representan por medio de reconfiguraciones discretas, o movimientos, de la red de espín. En *a*, tres cuantos de volumen conectados se funden para dar un solo cuanto de volumen; también puede suceder el proceso inverso. En *b*, dos volúmenes dividen el espacio y conectan volúmenes adyacentes de manera diferente. Si se los considerara poliedros, se adherirían por su cara común y después se partirían como un cristal que pasara a exfoliarse por un plano diferente. Estos movimientos de las redes de espín no sólo tienen lugar cuando se producen cambios a gran escala en la geometría del espacio; consideradas fluctuaciones cuánticas a la escala de Planck, suceden incesantemente.



HAY OTRA MANERA de representar los movimientos: la espuma de espín (*c*). Consiste en añadir la dimensión temporal a una red de espín; las líneas de ésta se convierten en planos y los nodos en líneas. Una sección de la espuma de espín en un instante dado es una red de espín; con una serie de cortes a tiempos diferentes, se genera una secuencia de "fotogramas" de la película de la evolución de la red de espín en el tiempo (*d*). Pero observemos que la evolución, que a primera vista parece suave y continua, en realidad es discontinua. Todas las redes de espín que incluyen la línea naranja (*los tres primeros fotogramas que se muestran*) representan la misma geometría del espacio. La longitud de la línea naranja no importa; lo que importa para la geometría es cómo se conectan las líneas y qué números etiquetan cada línea. Es lo que define cómo se disponen los cuantos de volumen y de área y cuál es su tamaño. Así, en *d*, la geometría permanece constante durante los tres primeros fotogramas, con 3 cuantos de volumen y 6 de área superficial. Después, la geometría cambia discontinuamente: se convierte en un único cuanto de volumen y 3 de área superficial, tal y como se muestra en la última figura. De esta manera, el tiempo definido por una espuma de espín evoluciona mediante una serie de movimientos abruptos y discretos, no como un fluido continuo.

Aunque hablar de tales secuencias como de los fotogramas de una película ayuda a la visualización, resulta más correcto comparar la evolución de la geometría a los discretos tics y tacs de un reloj. En un tic, el cuanto de área naranja está presente; en el tic siguiente, ya no; en realidad, la desaparición del cuanto de área naranja *define* el "tic". La diferencia en tiempo de un tic al siguiente viene a ser el tiempo de Planck, 10^{-43} segundos. Pero el tiempo *no existe* entre los tics; no hay en realidad un "entre", de la misma manera que no hay "agua" entre dos moléculas de agua contiguas.



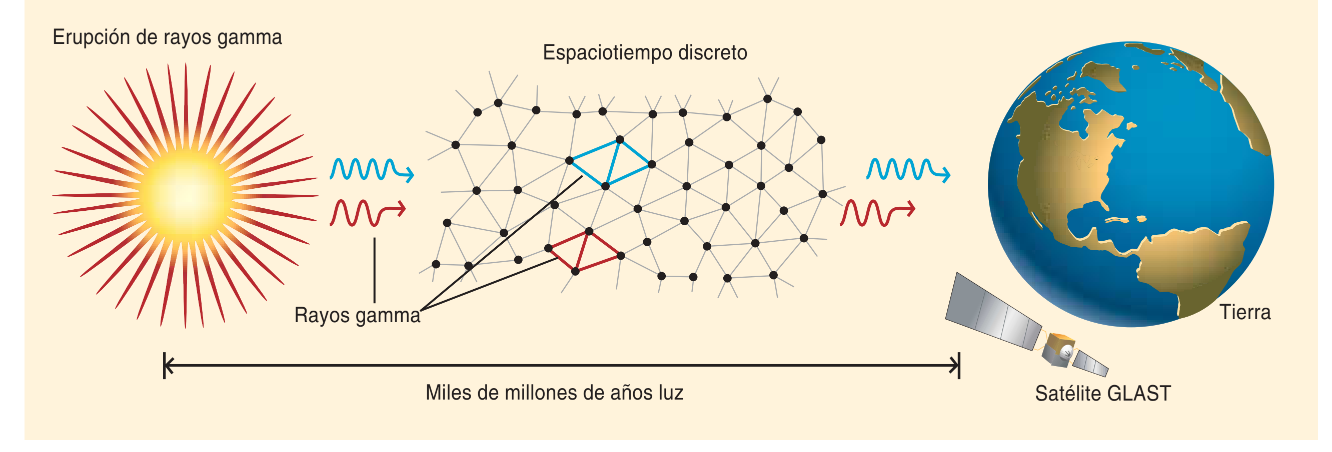


FUENTE: *A* Y *B* ADAPTADO DE FOTINI MARKOPOULOU (http://arxiv.org/abs/gr-qc/9704013/); *C* ADAPTADO DE CARLO ROVELLI (http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806121/); NADIA STRASSER

UNA COMPROBACION EXPERIMENTAL

LA RADIACION DE LAS ERUPCIONES de rayos gamma, remotas explosiones cósmicas, quizá proporcione una forma de comprobar la certeza de la teoría de la gravedad cuántica de bucles. Se produjeron a miles de millones de años luz de distancia y emiten una cantidad de rayos gamma enorme en un breve lapso de tiempo. Según la gravedad cuántica de bucles, un fotón, a medida que se mueve por la red de espín que constituye el espacio, ocupa en cada instante una cierta región de líneas (un número muy grande de líneas, no sólo las cinco pintadas aquí).

La naturaleza discreta del espacio hace que los rayos gamma de muy alta energía viajen un poco más deprisa que los de energía menor. La diferencia es pequeña, pero el efecto no deja de acumularse durante los miles de millones de años del viaje. Que los rayos gamma de una erupción llegasen a la Tierra en momentos un poco diferentes según cuál fuere su energía, constituiría una prueba a favor de la gravedad cuántica de bucles. El satélite GLAST, que debería lanzarse en 2006, tendrá la precisión requerida para este experimento.



NADIA STRASSER

A primera vista, se tiene la impresión de que cualquier comprobación experimental de la gravedad cuántica de bucles plantea imponentes dificultades técnicas, ya que sus efectos característicos sólo son apreciables a la escala de Planck, ese tamaño de los cuantos de área y de volumen tan pequeño: 16 órdenes de magnitud por debajo de la escala sondeada por los aceleradores de partículas de mayor energía que hay proyectados (cuanto menor sea la escala escrutada, mayor habrá de ser la energía). Debido a que no podemos alcanzar la escala de Planck con un acelerador, muchos tienen pocas esperanzas de que se lleguen a contrastar las teorías de la gravedad cuántica.

Sin embargo, en años recientes, un puñado de jóvenes investigadores ha ideado nuevas maneras de comprobar las predicciones de la gravedad cuántica de bucles. Podrían ejecutarse enseguida, porque se basan en la propagación de la luz a través del universo. Cuando la luz se mueve a través de un medio, su longitud de onda sufre algunas distorsiones, que conducen a que parezca que un palo se dobla en el agua o a que se separen las distintas longitudes de onda o colores. Estos efectos también tienen lugar al atravesar la luz y las partículas el espacio discreto que una red de espín describe.

Desgraciadamente, la magnitud de estos efectos es proporcional a la razón entre la longitud de Planck y la longitud de onda. Para la luz visible, no llega a 10^{-28}; incluso para los rayos cósmicos más energéticos jamás observados, vale sólo una milmillonésima.

Para cualquier radiación que podamos observar, los efectos de la estructura granular del espacio son muy pequeños. Pero se acumulan cuando la luz recorre una larga distancia. Y nos llegan luz y partículas emitidas a miles de millones de años luz de distancia; por ejemplo, la radiación de las erupciones de rayos gamma [*véase* “Las explosiones más brillantes del universo,” por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2003].

Esas erupciones expulsan fotones a lo largo de un amplio intervalo de energías en explosiones muy breves. Los cálculos de la gravedad cuántica de bucles de Rodolfo Gambini, de la Universidad de la República, en Uruguay, Jorge Pullin, de la Universidad estatal de Louisiana, y otros, predicen que los fotones de diferentes energías deben viajar a velocidades un poco distintas y, por tanto, llegar en instantes ligeramente distintos también. Podríamos buscar este efecto en los datos compilados por los satélites que han observado erupciones de rayos gamma. Hasta ahora, la precisión es del orden de mil veces inferior a la necesaria, pero un nuevo observatorio en órbita, GLAST, planeado para el año 2006, tendrá la precisión requerida.

El lector se puede preguntar si este resultado implica que la teoría de la relatividad especial de Einstein yerra cuando predice una velocidad de la luz universal. Giovanni Amelino-Camelia, de la Universidad de Roma La Sapienza, João Magueijo, del Colegio Imperial de Londres, yo mismo, hemos desarrollado versiones modificadas de la teoría de Einstein donde los fotones de alta energía viajan a diferentes velocidades. Nuestras teorías proponen que la velocidad universal es la de los

fotones de baja energía, es decir, la de la luz de longitud de onda larga.

El espaciotiempo discreto quizás afecte a los rayos cósmicos de muy alta energía. Hace más de 30 años, se predijo que el fondo cósmico de microondas que llena el espacio dispersaría los protones de los rayos cósmicos de energía mayor que 3×10^{19} electronvolts; nunca alcanzarían la Tierra. Sorprendentemente, AGASA, un experimento japonés, ha detectado más de 10 rayos cósmicos con una energía por encima de ese límite. Resulta que la estructura discreta del espacio puede elevar la energía requerida para que se produzca la dispersión, con lo cual alcanzarían la Tierra protones de rayos cósmicos de mayor energía. Si las observaciones de AGASA se confirman y no se encuentra ninguna otra explicación, quizás hayamos ya detectado la granularidad del espacio.

El cosmos

La gravedad cuántica de bucles no sólo formula predicciones sobre determinados fenómenos, como los rayos cósmicos de alta energía. También se refiere a los primerísimos momentos tras la gran explosión. La relatividad general predice que hubo un primer instante del tiempo, pero esta conclusión ignora la física cuántica (debido a que la relatividad general no es una teoría cuántica). Recientes cálculos de la gravedad cuántica de bucles, de Martin Bojowald, del Instituto Max Planck para Física Gravitacional de Golm, indican que la gran explosión es en realidad un "gran rebote", antes del cual el universo se fue contrayendo rápidamente. Se está trabajando mucho para conseguir predicciones sobre el universo primitivo que puedan comprobarse mediante futuras observaciones cosmológicas. No es imposible que se descubran, en los días de nuestra vida, indicios del tiempo anterior a la gran explosión.

Parecida profundidad presentan las cuestiones concernientes a la constante cosmológica, una densidad de energía positiva o negativa que quizás impregne el espacio "vacío". Recientes observaciones de supernovas distantes y del fondo cósmico de microondas indican con claridad que esta energía existe, es positiva y acelera la expansión del universo [*véase* "El universo y su quintaesencia", por Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo, 2001]. A la gravedad cuántica de bucles no le cuesta incorporar la densidad de energía positiva. Se demostró en 1989, cuando Hideo Kodama, de la Universidad de Kyoto, escribió ecuaciones que describen un estado cuántico exacto de un universo con constante cosmológica positiva.



4. TODAVIA SE ESTA ESTUDIANDO cómo la realidad clásica surge del espaciotiempo cuántico.

DUSAN PETRICIC

Muchas cuestiones abiertas quedan por contestar en la gravedad cuántica de bucles. Algunas son asuntos técnicos. Nos gustaría también descubrir cómo debería modificarse, si es que hay que modificarla, la relatividad especial a energías extremadamente elevadas. Hasta ahora, nuestras especulaciones al respecto no se fundamentan con solidez en los cálculos de la gravedad cuántica de bucles. Y querríamos saber si la relatividad general clásica ofrece, en todas las circunstancias, una buena descripción aproximada para distancias mucho mayores que la longitud de Planck. (Actualmente sólo sabemos que la aproximación es buena para ciertos estados donde ondas gravitatorias más bien débiles se propagan por un espaciotiempo que, por lo demás, es plano.) Finalmente, nos gustaría determinar si la gravedad cuántica de bucles tiene algo que decir, o no, acerca de la unificación: ¿son las diferentes fuerzas, incluida la gravedad, aspectos de una sola fuerza fundamental? La teoría de cuerdas se basa en una cierta idea de la unificación, pero nosotros también concebimos una manera de lograr la unificación mediante la gravedad cuántica de bucles.

Esta teoría ocupa un lugar muy importante en el desarrollo de la física. Se puede defender que es *la* teoría cuántica de la relatividad general, ya que le basta con los principios básicos de la teoría cuántica y la teoría de la relatividad, a los que no ha de añadir ninguna hipótesis. La gran diferencia que aporta un espaciotiempo discontinuo descrito por redes y espumas de espín, emerge de las matemáticas de la propia teoría; no se introduce a modo de postulado *ad hoc*.

Sin embargo, nada se ha expuesto aquí que no sea puramente teórico. El espacio quizá sea continuo, por mucho que empequeñezcamos la escala a que lo analicemos. Habría entonces que inclinarse por postulados más radicales, los de la teoría de cuerdas quizá. Esto es ciencia: al final el experimento decidirá. La buena nueva es que la decisión puede estar al caer.

El autor

Lee Smolin es miembro del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Waterloo, Ontario, y profesor adjunto de física de la Universidad de Waterloo. Doctor por la Universidad de Harvard, ha pertenecido a los claustros de Yale, Syracuse y Pennsylvania.

Bibliografía complementaria

THREE ROADS TO QUANTUM GRAVITY. Lee Smolin, Basic Books, 2001.

THE QUANTUM OF AREA? John Baez en *Nature*, vol. 421, páginas 702-703; febrero, 2003.

HOW FAR ARE WE FROM THE QUANTUM THERY OF GRAVITY? Lee Smolin. Marzo, 2003. En http://arxiv.org/hep-th/0303185.

WELCOME TO QUANTUM GRAVITY. Sección Especial. *Physics World*, vol. 16, número 11, páginas 27-50; noviembre, 2003.

LOOP QUANTUM GRAVITY. Lee Smolin. En www.edge.org/3rd_culture/smolin03/smolin03_index.html.



Pérdida de sincronía en los ecosistemas

Con el adelanto de las temperaturas primaverales, las especies interdependientes de numerosos ecosistemas pierden la sincronía

Daniel Grossman

En la Inglaterra de mediados del siglo pasado, Richard Fitter disfrutaba con su hijo Alastair de largos paseos por el campo. Sin propósito científico alguno, se entretenía anotando la fecha de floración de cientos de especies de plantas, de la llegada primaveral de docenas de aves, de la partida de las mariposas a finales de verano y de otras señales del paso de las estaciones. En la actualidad, Richard Fitter, autor de casi tres docenas de libros sobre flores, aves y temas afines, es un reconocido naturalista de 90 años.

Con el tiempo, Alastair se hizo también naturalista y hoy imparte clases de ecología en la Universidad de York. Siendo adulto, se percató del valor de las notas de su padre: constituían uno de los pocos registros sistemáticos de la fenología (la relación entre la vida de animales y plantas y las variaciones del tiempo atmosférico) de numerosas especies, realizado por un solo observador en un mismo lugar y durante tanto tiempo. Así, en 2001, cuando Richard se trasladó de casa, Alastair decidió repasar los apuntes de su progenitor. Para entonces, se había confirmado que la Tierra se está calentando a una rapidez asombrosa. La temperatura superficial del planeta ha aumentado unos 0,6 ºC en los últimos 100 años. El decenio de 1990 fue el más cálido de cuantos se tengan registros. Quizá los datos de su padre podrían corroborar con la vida vegetal lo que los climatólogos habían demostrado con los termómetros.

Alastair Fitter descubrió algo asombroso. Por sí solos, los registros que él había tomado a principios de los años noventa no mostraban ningún patrón coherente. Pero al comparar las fechas de floración del decenio entero de los noventa con los registros de los cuatro decenios precedentes, encontró que la floración de 385 plantas se había adelantado una media de 4,5 días. Dentro de ese grupo, un subgrupo de 60 especies florecían, por término medio, dos semanas antes. Con ello demostró que, al menos en los aledaños de Oxford, el cambio climático se está produciendo con notable rapidez.

Además de los sorprendentes resultados que los Fitter publicaron conjuntamente en 2002, varios estudios recientes revelan cambios acelerados en ciertas pautas biológicas de plantas y animales. Ese mismo año, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) publicó un informe realizado a partir de la revisión de 2500 artículos. Varios de ellos abordaban la relación entre especies y temperatura durante al menos los últimos 20 años. De las más de 500 especies de aves, anfibios, plantas y otros organismos estudiados, el 80 por ciento había cambiado, en la forma

1. MUCHAS ESPECIES VEGETALES de los aledaños de Oxford florecieron antes en el decenio de los noventa que en el período de 1954 a 1990, en promedio. Entre los cambios más espectaculares se cuenta el de *Lamium album*, la ortiga muerta. Acostumbrada a hacerlo en torno al 18 de marzo, floreció el 23 de enero.

GUSTO/SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC.

en que cabría esperar de un aumento de temperaturas, la fecha de reproducción o migración, la duración de la estación de crecimiento o el tamaño y distribución de la población. El informe llegaba a la conclusión de que, a lo largo del siglo XX, el cambio climático regional, en particular la subida de temperatura, había producido un impacto perceptible en los sistemas biológicos.

Igual que el estudio de los Fitter sobre la floración de plantas, la mayoría de los trabajos revisados por el PICC no ahondaban en el carácter perjudicial, potencial o real, de tales cambios. Alastair Fitter cree que los efectos adversos resultan inevitables, pues las variaciones en los períodos de floración pueden determinar la extinción de ciertas especies.

Se han acometido diversas investigaciones para averiguar si el calentamiento global perjudica las relaciones entre plantas y animales del mismo ecosistema. En algunos casos, la profecía de Fitter empieza a hacerse realidad: las temperaturas en aumento están degradando los eslabones de las cadenas alimentarias y la eficiencia de algunos organismos para sobrevivir en sus hábitats. En un caso ya acaba de predecirse que el calentamiento global eliminará una especie de toda una región en los próximos 15 años. Si bien aún no disponemos de suficientes datos para generalizar el desmoronamiento de los ecosistemas, los hallazgos apuntan en una dirección preocupante.

Orugas y pájaros madrugadores

Marcel E. Visser, del Instituto Holandés de Ecología, viene investigando desde 1955 la dinámica poblacional del carbonero común (*Parus major*). En el marco de ese estudio examina los efectos en cascada del calentamiento global sobre una cadena alimentaria. Los carboneros comunes del Parque Nacional De Hoge Veluwe, una extensa zona boscosa cercana al instituto de Visser, comienzan sus rituales anuales de nidificación en abril y mayo. Con sus colaboradores, Visser registra las actividades y el estado de salud de todas y cada una de las parejas reproductoras que medran en las 400 pajareras de madera del parque. Visser coloca una trampa de metal en una caja nido. Al poco, uno de los dos adultos que anida en la caja cae en la trampa. Visser abre con cuidado la tapadera y saca el pájaro. Tiene el dorso gris, la cabeza blanca y negra y el pecho de color amarillo pálido con una lista negra. Suavemente, inmoviliza la cabeza del pájaro entre sus dedos índice y medio y toma algunas medidas con una regla. Pesa al animal en una pequeña bolsa de plástico. Repetidas miles de veces durante cada estación, estas estadísticas constituyen la materia prima fundamental para la investigación. Cada caja se visita semanalmente, excepto cuando se acerca la época de la eclosión (y, después, la de abandonar el nido), período en el que las inspecciones se realizan a diario.

En el año 2003 los carboneros pusieron los huevos casi el mismo día que en 1985; en principio, un fenómeno irrelevante. Pero a lo largo de ese intervalo de 18 años, subieron dos grados las temperaturas primaverales de la región, en particular en su sector central (del 16 de abril al 15 de mayo). Y aunque la fenología de los carboneros no ha cambiado con este calentamiento, sí lo ha hecho la de las orugas de la mariposa nocturna *Operophtera brumata*; ésta, junto a otras especies menos abundantes, sirve de alimento a los polluelos de los carboneros.

Hoy, el máximo de biomasa de las orugas (el total de carne disponible para los pájaros) se adelanta en dos semanas con respecto al momento culminante de 1985, clímax que coincidía con el momento de mayor demanda: el de la eclosión de los polluelos. Ahora, la mayoría de los carboneros rompen el cascarón cuando termina la estación de las orugas. Ante la escasez consiguiente de alimento, sólo las crías madrugadoras comen gusanos.

No son sólo los pájaros y las polillas de esta red trófica los que están perdiendo sincronía. ¿Qué ocurre en niveles inferiores de la cadena alimentaria? La polilla se alimenta de las hojas jóvenes y tiernas de los robles donde están las pajareras. Para sobrevivir, la oruga debe hacer eclosión justo cuando las yemas "revientan" y las hojas de los robles se abren. Si el insecto sale del huevo más de unos cinco días antes del reventón de las yemas, morirá de hambre. Lo mismo sucederá si esto ocurre más de dos semanas después, porque las hojas de roble se llenan de tanino, aborrecido por la oruga. Visser ha descubierto que, en el parque De Hoge Veluwe, las yemas de roble revientan ahora unos 10 días antes de lo que acontecía 20 años atrás. Pero la eclosión de las orugas se ha adelantado, en el mismo período, 15 días, sobrecompensando en cinco días el cambio operado en los robles. Puesto que en 1985, las orugas ya salían varios días antes del reventón de las yemas del roble, deben ahora esperar, por término medio, unos ocho días para tener comida.

De la investigación de Visser se desprende la caída demográfica de la población de *Operophtera brumata* en De Hoge Veluwe. Con todo, los registros no abarcan un período de extensión suficiente para excluir que el fenómeno pudiera considerarse parte de un ciclo natural. Por ahora, el desfase entre las orugas y los pájaros no ha tenido un efecto manifiesto sobre la densidad de población de carboneros. Ello podría

Resumen/Ecosistemas sometidos a estrés

- El calentamiento de la superficie del planeta ha empezado a alterar las sincronías entre especies en algunos ecosistemas. Se están debilitando las cadenas alimentarias; así, las que relacionan ciertas aves y las orugas de las que se nutren.
- Aunque de los casos registrados no pueden extraerse conclusiones generales, los indicios resultan alarmantes. Muchas especies podrían hallarse en peligro.
- Fomentan esta inquietud las investigaciones que demuestran que el cambio climático del final de la última glaciación arruinó los ecosistemas existentes y creó otros nuevos, sin dejar refugio alguno para las especies que ya no encajaban en ellos.





2. DE ACUERDO CON LOS REGISTROS TOMADOS por Alastair Fitter (*abajo*) y su padre, Richard, las fechas de floración de cientos de plantas en Inglaterra han cambiado en los últimos años. Si bien la mayoría han adelantado el momento, esta budleya de las mariposas (*Buddleja davidii*, *izquierda*) y unas pocas más lo han demorado.

WOLFGANG KAEHLER *Corbis* (*izquierda*); DANIEL GROSSMAN (*derecha*); FUENTE: ALASTAIR Y RICHARD FITTER, *Science*; NADIA STRASSER (*gráfica*)

deberse a que las fluctuaciones anuales (sujetas a la disponibilidad de alimento durante el invierno) superan, por el momento, el impacto del calentamiento. Sin embargo, en un sistema basado en la sincronía, el desacoplamiento entre los eslabones de la cadena alimentaria no puede continuar aumentando sin consecuencias. Es sólo cuestión de tiempo.

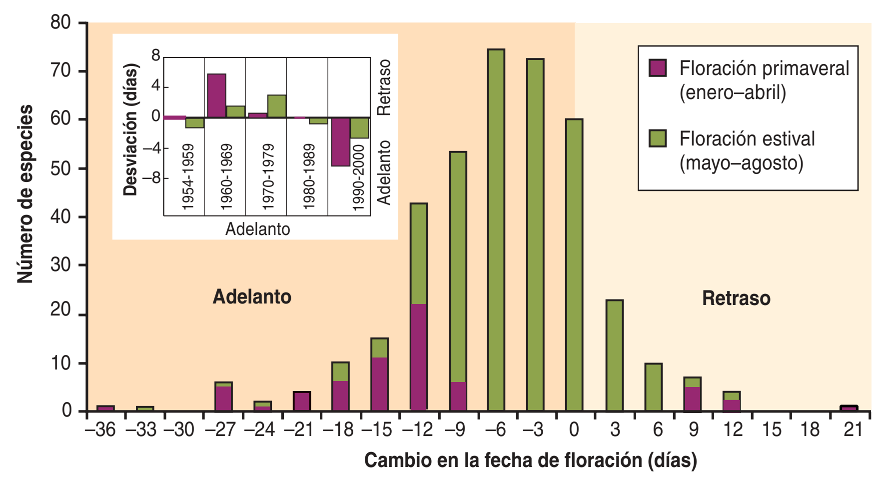
Lo preocupante no es ya que un caso particular, los carboneros comunes de De Hoge Veluwe, se halle al borde de la desaparición, sino, sobre todo, que su disminución sugiere que hay otras muchas especies en peligro. Esa vulnerabilidad al cambio climático parece extenderse a todos los ecosistemas.

Ajuste y desajuste

Al proponerse explicar las variaciones interanuales en las poblaciones de arenque, David Cushing, del Laboratorio de Pesquerías de Lowestoft, estudió en los años sesenta el fitoplancton, que nutre a sus larvas. Demostró que, cuando la eclosión de las larvas de arenque coincidía con proliferaciones de fitoplancton, sobrevivía hasta el estado adulto una notable proporción de la progenie. A semejante feliz sincronía la designó "ajuste". Su antónimo, "desajuste", correspondía a la ausencia de sincronía entre eclosión larvaria y alimento fitoplanctónico, que explicaba la merma de pesca.

Los conceptos de ajuste y desajuste se utilizan ahora para explicar el impacto del cambio climático. Su fuerza reside en que el término ajuste permite referirse a diferentes clases de relación. Sirve para describir la relación temporal entre depredador y presa, en el ejemplo de los carboneros y las orugas, o entre animal y planta, en el caso de las orugas y los robles. Puede asimismo aplicarse a la relación temporal entre plantas distintas. A modo de botón de muestra, los Fitter encontraron que los cambios recientes en las épocas de floración diferían de una especie a otra. Esta divergencia, sostiene Alastair, se traducirá en una alteración de la competencia por la luz, los nutrientes y el agua, lo que acarreará profundas consecuencias en los ecosistemas y en el curso evolutivo.

Las nociones de ajuste y desajuste pueden aplicarse, asimismo, a la relación entre animales o plantas y su entorno físico. En una investigación realizada en Colorado, se ha demostrado que los robines americanos (*Turdus migratorius*) que



3. LAS FECHAS DE FLORACION de 385 especies de plantas desde 1991 a 2000 (el decenio más cálido del que se tenga constancia) se adelantaron, por término medio, en 4,5 días respecto a la media de 1954 a 1990. Para mayor claridad, se han omitido dos especies con desviaciones extremas: *Lamium album* (–55 días) y *Buddleja davidii* (+36 días). Un gráfico de la primera floración para cada década comparada con la media de todo el período registrado (1954-2000) resalta el cambio operado en los años noventa (*inserto*).



4. LOS REGISTROS DE CRECIMIENTO (*arriba*) del carbonero común, repetidos miles de veces cada estación por Marcel E. Visser (*izquierda*) y su equipo del Instituto Holandés de Ecología, arrojaron luz sobre la reacción del ecosistema local al cambio climático. La investigación, iniciada en 1955 para avanzar en la comprensión de la dinámica poblacional de la especie, se ha convertido en una de las mejores muestras de la pérdida de sincronía entre eslabones de una cadena alimentaria causada por el cambio climático.

DANIEL GROSSMAN

migran a hábitats estivales de gran altitud han adelantado su llegada a dicha región. Dado que las condiciones que se encuentran son aún invernales, deben esperar hasta que la nieve se derrita para alimentarse y aparearse.

Puesto que los ajustes requieren a menudo sincronía entre especies dispares, resulta comprensible que el cambio climático provoque desajustes. Unas especies son sensibles a las temperaturas medias; otras, a las extremas. Carboneros, robles y polillas parecen responder a la temperatura, aunque cada uno lo hace de una manera distinta. La fecha de eclosión de los huevos de carbonero común se determina aproximadamente con un mes de antelación, cuando se realiza la puesta. Según Visser, los pájaros basan la fecha de puesta en De Hoge Veluwe en las temperaturas de principios de primavera. Estas, a diferencia de las registradas a finales de la estación, no han cambiado en los últimos 30 años. La fecha de eclosión de los huevos de la mariposa nocturna depende de la conjugación de dos factores: el número de heladas en invierno y a principios de primavera (días en los que la temperatura desciende por debajo del punto de congelación) y las temperaturas de finales de invierno y principios de primavera. En los últimos decenios han subido la temperaturas del invierno y del comienzo de la primavera en De Hoge Veluwe, pero no se han registrado cambios en el número de días de helada. Por último, los robles tienden, tal parece, a ajustar el momento del estallido de los brotes en función de las temperaturas de finales de primavera, que han aumentado en dos grados desde 1980. En el transcurso de miles de años de coevolución, estos tres organismos habían logrado sincronizar sus ciclos biológicos sirviéndose de estas señales. Pero el calentamiento del clima ha desacoplado tales claves. Las viejas normas han dejado de operar.

Los animales que migran a grandes distancias se enfrentan a desafíos peculiares. Puede que tengan que utilizar señales de un hábitat para determinar la fecha de partida hacia otro. En el caso de las aves migratorias, la llegada al lugar de cría de verano puede requerir una perfecta sincronía con el abandono de las áreas de invernada. Pero las temperaturas del punto de invernada no tienen por qué cambiar al mismo ritmo que las de las áreas de nidificación, en particular si los lugares de verano y de invierno se ha-

llan separados por miles de kilómetros, un fenómeno habitual en las aves. Téngase presente que el clima no está cambiando de manera uniforme en todo el globo. En comparación con las regiones templadas, por ejemplo, los trópicos apenas experimentan cambio. La evolución de fenómenos climáticos como El Niño complica todavía más el cuadro general. Además, puesto que las temperaturas en los trópicos guardan escasa correlación con las de las regiones templadas, muchas aves ni siquiera utilizan señales climáticas para decidir cuándo marcharse de las localidades tropicales de invernada. Regulan sus viajes en función del fotoperíodo, la duración del día. Pero el calentamiento global no tiene ninguna influencia sobre el fotoperíodo. Así, dichas aves corren el peligro de llegar a sus áreas de reproducción demasiado pronto o demasiado tarde.

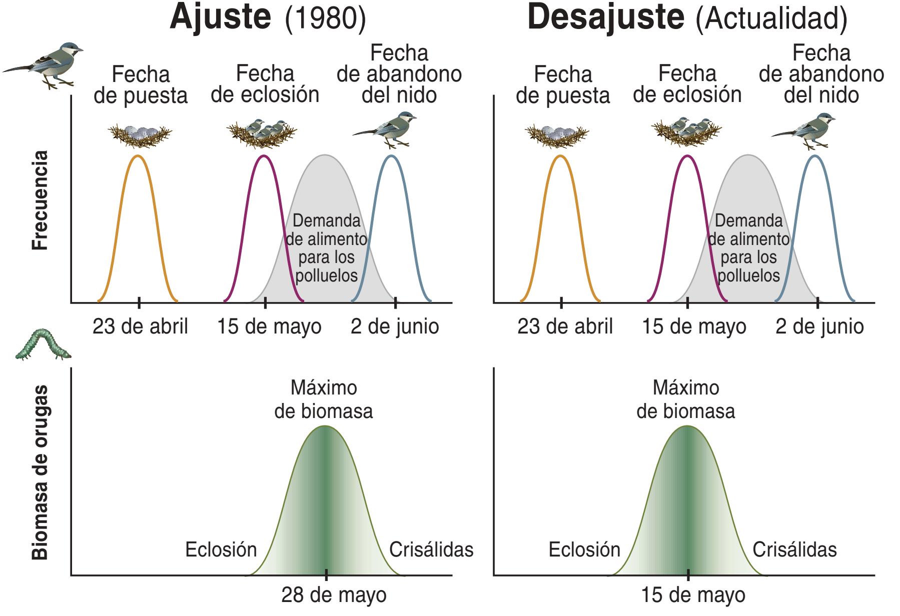
Según Christiaan Both, de la Universidad de Groninga, el papamoscas cerrojillo (*Ficedula hypoleuca*), que migra 5000 kilómetros desde el Africa Occidental tropical a De Hoge Veluwe, está sufriendo un desajuste entre las condiciones de nidificación y las de invernada. Como los carboneros comunes, los papamoscas cerrojillos alimentan a sus polluelos con orugas, que han adelantado en medio mes el momento de su abundancia máxima con respecto a 20 años atrás. Pero los papamoscas llegan prácticamente en la misma fecha hoy que en 1980. En 2001, Both y Visser observaron que la señal que los papamoscas utilizan para abandonar Africa es el fotoperíodo, lo que explica que su fecha de llegada no haya cambiado. Su criterio carece ahora de eficacia biológica.

Las aves han compensado su migración tardía acortando su período de descanso una vez han llegado a Holanda. El intervalo entre la llegada y la reproducción se ha reducido en 10 días desde 1980, pero ni siquiera esa estrategia les basta para sincronizar la producción de polluelos con el abastecimiento máximo de orugas. Hoy en día, sólo los papamoscas más madrugadores tienen una descendencia sana. El resto engendra una progenie con un peso inferior al normal; la mayoría de los hijos no retornan para reproducirse al año siguiente. Los pájaros han dejado de anidar en bosques con una estación de orugas más temprana. Hasta la fecha, no parece haber disminuido el número de papamoscas. Mas, para Both, la situación podría alterarse si continúa el calentamiento; por una razón de peso: es probable que las aves hayan agotado su capacidad de reducir el tiempo entre la llegada y la cópula. Both y Visser sospechan que el mismo mecanismo que afecta a los papamoscas cerrojillos podría haber intervenido en la caída demográfica de otras aves migratorias europeas en los últimos años.

El pájaro bobo, amenazado por la nieve

Pese a las numerosas señales de alerta, no se conocen todavía muchos casos en los que un desajuste causado por el cambio climático haya tenido un impacto grave en una población de plantas o animales. Sin embargo, William Fraser, de la Universidad estatal de Montana, sostiene que el cambio de clima está provocando la extinción de los pájaros bobos de Adelia (*Pygoscelis adeliae*) que medran en la costa occidental de la península Antártica. Durante los últimos 30 años, Fraser ha venido registrando una sorprendente reducción del 70 por ciento en el número de pájaros bobos de Adelia que anidan en diversas islas de las inmediaciones de la Estación Palmer, una de las tres bases de investigación que los EE.UU. tienen en la Antártida. En su opinión, el cambio de clima afecta a las aves a través de un mecanismo hasta ahora insospechado, prueba de la dificultad de prever las respuestas de la naturaleza ante la subida de la temperatura.

La península Antártica ha experimentado un calentamiento superior al experimentado en cualquier otro lugar del planeta. En el transcurso de los últimos 50 años, las temperaturas invernales han subido casi seis grados. Aunque pueda parecer una contradicción, este calentamiento se ha traducido en un aumento de las nevadas. En efecto, el incremento de la temperatura ha reducido la capa impermeable de hielo que cubre el océano; gracias a ello, pasa del agua al aire más humedad, que cae en forma de nieve.



5. ESPECIES INTERDEPENDIENTES se "desacoplan" debido al estrés provocado por el calentamiento global. En el Parque Nacional De Hoge Veluwe, los cambios operados en los patrones meteorológicos han repercutido en los botones de los robles, que maduran antes en hojas. En consecuencia, las orugas de la mariposa nocturna *Operophtera brumata* (alimento básico para los polluelos del carbonero común) alcanzan ahora su máximo de biomasa antes (*derecha*) de lo que ocurría veinte años atrás (*izquierda*). La época de puesta de huevos no se ha modificado.

FUENTE: MARCEL E. VISSER, CHRISTIAAN BOTH Y MARCEL M. LAMBRECHTS; NADIA STRASSER

EL AVANCE DE LA PRIMAVERA Y LAS ASINCRONIAS ENTRE ESPECIES

EN ESPAÑA, la temperatura media de muchos lugares ha aumentado más de un grado centígrado en los últimos 50 años. El "buen tiempo", la primavera, se adelanta. Las temperaturas que hace 50 años se registraban a principios de abril, se alcanzan ahora a principios de marzo. Puesto que la actividad de los organismos está fuertemente influenciada por la temperatura, no resulta extraño que este calentamiento altere los ciclos biológicos de plantas y animales.

Estos cambios también ocurren en los ecosistemas ibéricos. El autor, Iolanda Filella y Pere Comas han observado y descrito algunos de los más importantes. Las hojas de los árboles caducifolios brotan ahora, en promedio, unos 20 días antes que hace cincuenta años. Las de los manzanos, los olmos o las higueras salen con un mes de antelación, mientras que las de los almendros y los álamos lo hacen unos quince días antes. (Hay excepciones: las hojas de los castaños parecen inmutables a los cambios de temperatura.) Estos caducifolios alargan así su período vegetativo, no sólo porque adelantan la salida de las hojas, sino también porque se retrasa su caída, unos trece días por término medio. En otras palabras, el invierno nos llega más tarde.

Por otra parte, las plantas están también floreciendo y fructificando, en promedio, 10 días antes que 30 años atrás. La aparición de insectos se ha adelantado 11 días. Pero la naturaleza no actúa de forma homogénea. La respuesta al cambio climático difiere de una especie a otra: la zarzamora florece con más de un mes de adelanto, las amapolas lo hacen quince días antes, las encinas una semana, el olivo no se inmuta y el pino piñonero incluso se retrasa unos días. Semejante heterogeneidad de respuestas ante el cambio climático puede producir importantes asincronías en las interacciones entre las especies; por ejemplo, entre las plantas y sus polinizadores o entre las plantas y sus herbívoros. Termina así por alterarse la estructura de las comunidades. Ejemplos de asincronías como las descritas por Daniel Grossman en el artículo las tenemos también en nuestro país. Veamos algunos.

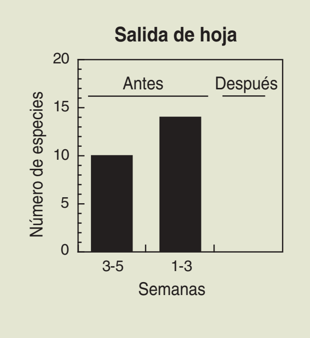
Considerando el adelanto de la salida de las hojas, de la floración, de la fructificación y de la aparición de los insectos y, por lo tanto, de la disponibilidad de la comida, se esperaría que las aves migratorias llegaran antes. Pero no ocurre así. El ruiseñor, la golondrina, el cuco o la codorniz están retardando su llegada a algunos lugares de la península una media de unas dos semanas respecto a lo registrado 30 años atrás. El retraso seguramente viene determinado por el cambio climático en el lugar de partida (las regiones subsaharianas) o en las zonas que cruzan en su ruta migratoria. La sequía y la deforestación del Sahel y la consecuente falta de alimento dificultan la preparación de su viaje y favorecen una llegada tardía.

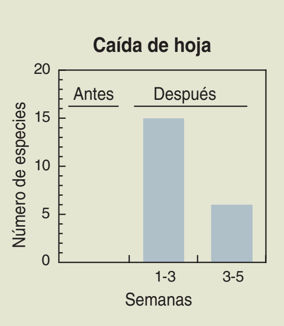
Por otra parte, algunas especies aprovechan la oportunidad de nuestro invierno cada vez más suave para no abandonar España. Se comportan así la abubilla y la cigüeña.

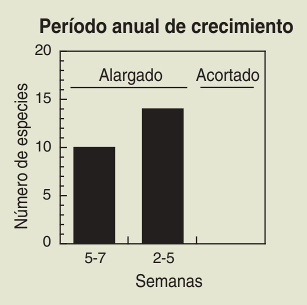
Todos estos cambios representan una amenaza para las aves migratorias que lleguen en un momento inapropiado para explotar el hábitat, puesto que deberán competir con las especies que se han quedado durante el invierno y, por tanto, se encuentran en mejores condiciones. De hecho, los estudios que Juan José Sanz y sus colaboradores, del Museo de Ciencias Naturales de Madrid, vienen llevando a cabo sobre el papamoscas cerrojillo sugieren que la asincronía que el reciente cambio climático ha generado entre la máxima disponibilidad alimentaria y la máxima demanda para la cría puede reducir el aporte energético parental y, en consecuencia, el desarrollo y la supervivencia de los polluelos en las poblaciones españolas. A tenor de sus observaciones, la estación de cría no se ha desplazado, mientras que sí lo han hecho las condiciones ambientales, bióticas y abióticas.

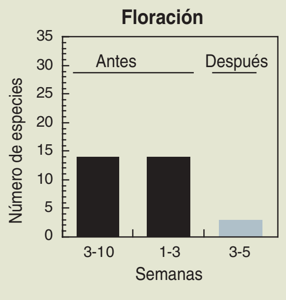
¿Hasta qué punto tienen las plantas y los animales capacidad para adaptarse o aclimatarse rápidamente a estos cambios climáticos? A corto plazo, las especies tienden a responder a las perturbaciones con la migración más que con la evolución. En las montañas, pueden migrar verticalmente distancias cortas (500 m bastan para contrarrestar un aumento de 3 ºC). De hecho, en montañas como las del Montseny, macizo de la sierra prelitoral catalana, se han descrito migraciones verticales de especies vegetales y animales inducidas por el reciente y "relativamente moderado" calentamiento del siglo XX. A pesar de esto, la migración hacia altitudes mayores comporta una reducción concomitante en el área total de cada hábitat, que puede llevar a la extinción de las especies que requieren una mayor extensión.

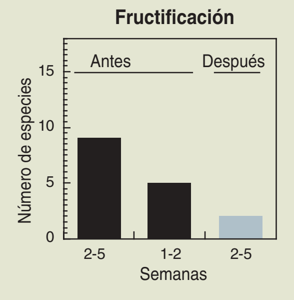
Los estudios paleoecológicos sugieren que muchas especies, tanto animales como vegetales, pueden migrar en latitud con suficiente celeridad como para adaptarse al cambio climático, si bien requieren ecosistemas contiguos no perturbados, lo que evoca la importancia de otros de los componentes del cambio global que estamos viviendo: los cambios en el uso del suelo y la fragmentación de los ecosistemas naturales. En estos desplazamientos también se pue-





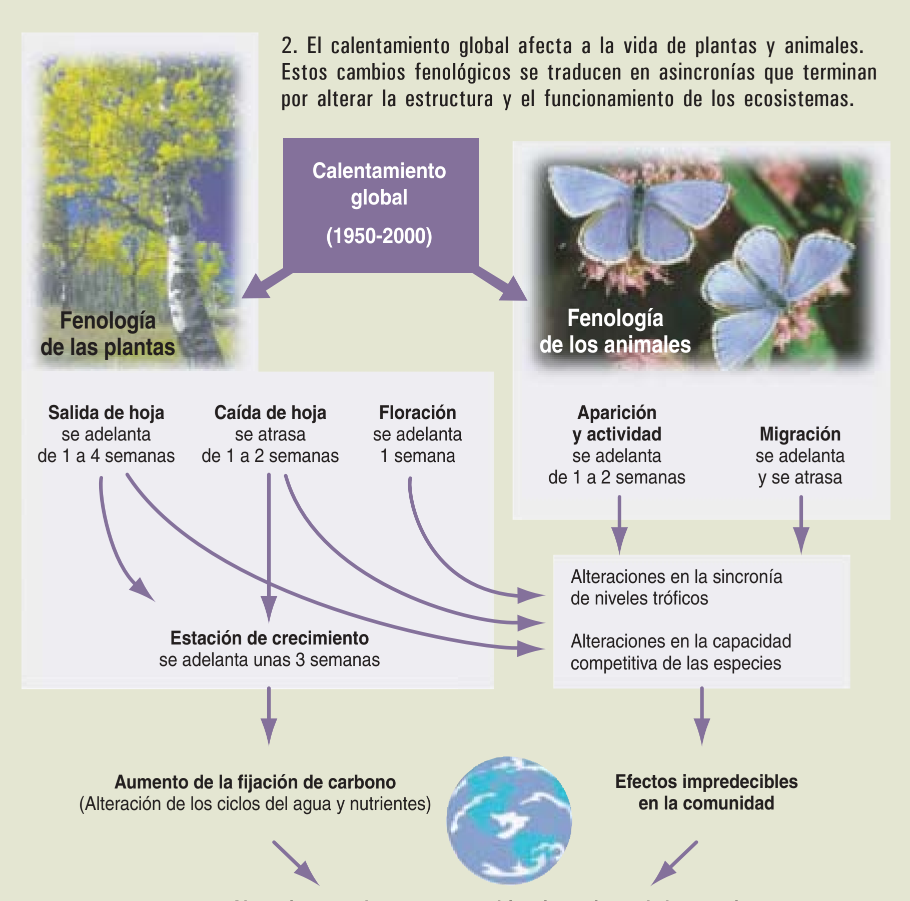






1. Cambios fenológicos en especies vegetales y animales de Cardedeu (Barcelona) durante el período 1952-2000.

LLEGAN TAMBIEN A ESPAÑA



2. El calentamiento global afecta a la vida de plantas y animales. Estos cambios fenológicos se traducen en asincronías que terminan por alterar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas.

den producir desajustes espaciales. En Sierra Nevada, por ejemplo, las poblaciones relictas de *Pinus sylvestris* se encuentran aisladas en las altas montañas, protegidas del ataque de la procesionaria. Sin embargo, los trabajos de Hodar, Castro y Zamora han mostrado que, como consecuencia del cambio climático, en los últimos años, la procesionaria ha aumentado su presencia a mayores altitudes y, por tanto, sus ataques a estos pinos. Si las temperaturas invernales continúan aumentando, la procesionaria del pino reducirá aún más la ya débil capacidad de regeneración de estas poblaciones relictas. Sin duda, un impacto peligroso sobre el pino silvestre de Sierra Nevada.

Por último, no podemos dejar de recordar que estas modificaciones del ciclo biológico de los organismos no son meros indicadores del cambio climático. Tienen una importancia ecológica crítica, pues afectan a la capacidad competitiva de las diferentes especies, a su conservación y, por tanto, a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Cuando observamos estos cambios a escala global, encontramos alteraciones muy notables, como el aumento en un 20 % de la actividad biológica de nuestro planeta en los últimos 30 años; incremento debido, en buena parte, al alargamiento del período productivo. Lo apreciamos en las imágenes de los satélites de observación de la Tierra, así como en la concentración atmosférica de CO_2: nos muestran un aumento de la oscilación estacional de CO_2 en los últimos decenios debido a la mayor disminución primaveral de la concentración de dióxido de carbono. Este alargamiento de la estación de crecimiento desempeña una función muy importante en la fijación global del carbono, la cantidad de CO_2 atmosférico, y en los ciclos del agua y de nutrientes. Repercute, pues, de una manera crítica en el funcionamiento de los ecosistemas. Y cabe recordar que todos estos cambios han tenido lugar con un calentamiento que es sólo un tercio (o menos) del previsto para el próximo siglo.

JOSEP PEÑUELAS
Unidad de Ecofisiología,
CSIC-CEAB-CREAF
Campus Universidad Autónoma
Barcelona

Según Fraser, las colonias que padecen mayores pérdidas viven en los taludes orientados al sur de las laderas de las áreas rocosas de nidificación. Se trata de las zonas que sufren el mayor impacto. Los taludes orientados al sur, al abrigo de los vientos invernales, son los últimos que se derriten en primavera, pues acumulan los ventisqueros en invierno a la vez que reciben poca radiación solar (las laderas orientadas al sur son solanas en el hemisferio norte, pero umbrías en el hemisferio sur). Los pájaros bobos de Adelia necesitan que las condiciones se sincronicen con precisión. El exceso de nieve lo está impidiendo.

Poco después de llegar a estas islas para criar en octubre, las aves necesitan el terreno libre para construir su nido de guijarros. Si la nieve no se derrite a tiempo, ocasionalmente intentarán anidar sobre ella, con pésimos resultados. Cuando la nieve termina por fundirse, los huevos quedan anegados. No se producen pollos vivos sino huevos hueros. Aunque la precipitación real varía de un año a otro, con el tiempo el incremento de nieve ha ido reduciendo el número de nuevos miembros que se añaden a las colonias, que están muriendo por agotamiento.

Fraser denomina al problema de los pájaros bobos un “desajuste entre la física y la biología”. A medida que el proceso siga su curso, se verá el avance de ese efecto insidioso: en 15 años ya no quedarán pájaros bobos de Adelia en la región. Estas aves, indicadores extremadamente sensibles a las perturbaciones climáticas, constituyen una prueba más de la transformación que está sufriendo nuestro planeta.

Los científicos creen que, en muchos casos, las plantas y los animales se adaptarán a las condiciones cambiantes, eludiendo así el destino que Fraser pronostica para los pájaros bobos de Adelia. Christiaan Both investiga la genética de los papamoscas cerrojillos para averiguar si determinadas familias han adelantado su migración. Ello plantearía la posibilidad de aparición de una subespecie de migración temprana. Sin embargo, resulta poco probable que un truco evolutivo pueda resolver el problema derivado



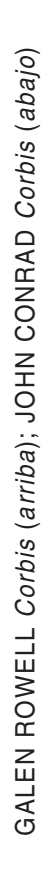
6. LOS PAJAROS BOBOS DE ADELIA nidificantes sufren el aumento de las nevadas, consecuencia del calentamiento de la costa occidental de la península Antártica. Al derretirse, la nieve torna hueros los huevos.

del calentamiento global. Veamos un ejemplo.

La evolución podría producir un carbonero común que pusiera los huevos antes y así recuperar la sincronía con las orugas de los robles del parque De Hoge Veluwe. Pero la puesta exige que las hembras estén bien alimentadas. Lo consiguen buscando insectos en un grupo distinto de árboles, sobre todo alerces y abedules, que abren sus hojas antes que los robles. Ni alerces ni abedules han cambiado la fecha de reventón de las yemas tanto como los robles. Si esta tendencia continúa, y si los insectos que medran en alerces y abedules permanecen en sincronía con el reventón de las yemas de dichos árboles, los carboneros no podrán prepararse para adelantar la cría.



7. PAJARO BOBO DE ADELIA perteneciente a una población próxima a la Estación Palmer (base norteamericana de investigación en la Antártida), que ha visto mermar su número en un 70 por ciento en 30 años.



Ciertas aves e insectos están ya respondiendo al calentamiento global, mediante su desplazamiento hacia áreas de distribución más septentrionales o, en zonas montañosas, hacia altitudes mayores. Especies menos ágiles como los árboles quedarán rezagadas. Terry L. Root, del Centro para la Ciencia y la Política Ambientales de la Universidad de Stanford, advierte que estas respuestas diferenciales provocarán el "descalabro" de los ecosistemas, que dejarán en su lugar a otros, alterados y empobrecidos. Ciudades, explotaciones agrícolas, carreteras y otras intervenciones humanas que fragmentan el territorio agravan el problema.

El año pasado, Root ofrecía, en un artículo publicado en *Nature*, pruebas de las "huellas" del calentamiento global en plantas silvestres y animales salvajes. Apela a las investigaciones sobre polen de las postrimerías de la última glaciación: a medida que la capa de hielo que cubría la mayor parte de América del Norte se fue retirando hacia el norte, los bosques avanzaron en la misma dirección. Pero las comunidades no se trasladaron en bloque, sino que con el progreso de los bosques cambió la composición de plantas y animales. Root teme que el calentamiento global pueda producir resultados similares, creando nuevos ecosistemas y desechando aquellas especies que no encajen en ellos.

Resulta evidente que los seres vivos no permanecen al margen del cambio climático. Quedan por determinar la gravedad y la extensión del problema, así como algunas cuestiones intrincadas. ¿Por qué razón los carboneros comunes del parque De Hoge Veluwe no consiguen mantenerse en sincronía con las orugas de *Operophtera brumata*, mientras que pájaros de la misma especie en una localidad cerca de Cambridge, a sólo 400 km de distancia, han alterado su ciclo biológico a la par que esos mismos insectos?

El autor

Daniel Grossman trabaja sobre el calentamiento global y su repercusión en los ecosistemas.

Bibliografía complementaria

HOW CLIMATE CHANGE ALTERS RHYTHMS OF THE WILD. Bernice Weuthrich en *Science*, vol. 287, n.º 5454, págs. 793-795; 4 de febrero, 2000.

ADJUSTMENT TO CLIMATE CHANGE IS CONSTRAINED BY ARRIVAL DATE IN A LONG DISTANCE MIGRANT BIRD. Christiaan Both y Marcel E. Visser en *Nature*, vol. 411, págs. 296-298; 17 de mayo, 2001.

CLIMATE CHANGE AND BIODIVERSITY. Dirigido por Habiba Gitay, Avelina Suárez, Robert T. Watson y David Jon Dokken. IPCC Technical Paper, 2002.

RAPID CHANGES IN FLOWERING TIME IN BRITISH PLANTS. A. H. Fitter y R. S. R. Fitter en *Science*, vol. 296, págs. 1689-1691; 31 de mayo, 2002.

WILDLIFE RESPONSES TO CLIMATE CHANGES: NORTH AMERICAN CASE STUDIES. Dirigido por Stephen H. Schneider y Terry L. Root. Island Press, 2002.

Etnoclimatología de los Andes

Un estudio convergente de diferentes disciplinas pone de manifiesto el fundamento científico del método que los campesinos de los Andes siguen para predecir el carácter de la estación de lluvias

Benjamin S. Orlove, John C. H. Chiang y Mark A. Cane

A finales de junio, los campesinos de los Andes peruanos y bolivianos se congregan en pequeños grupos hacia la mitad de la noche. Han subido empinadas pendientes y, a menudo, escalado los picos. Tras el solsticio de invierno, son las noches más largas del año y, con frecuencia las más frías también. Cientos de tales grupos de aldeanos se reúnen en una zona extensa, desde Huancayo, a unos 12 grados al sur del ecuador, hasta Potosí, que queda a 19 grados sur. Los campesinos se apiñan en impaciente espera. Están aguardando el momento en que puedan ver las Pléyades, un cúmulo estelar de la constelación de Tauro. En esa época del año, las Pléyades aparecen a baja elevación en el cielo nororiental cuando empieza a alborear. Los campesinos han acudido convencidos de que, según se muestren las Pléyades, podrán pronosticar el momento de la llegada, meses más tarde, de la estación lluviosa y la cantidad de precipitación que caerá. Aunque esta forma curiosa de astrología podría dar la impresión de tratarse de una forma singular de superstición, hemos demostrado que se asienta sobre base científica.

Nuestro proyecto comenzó después que dos de los autores (Orlove y Cane) oyeran hablar, por separado, de tales prácticas. Orlove tropezó con ellas en 1973, cuando realizaba una investigación de campo en los Andes peruanos meridionales para su tesis doctoral en antropología. Movido por la curiosidad, se puso de acuerdo para unirse a un grupo de campesinos indígenas y asistir a ese acontecimiento anual. Subió con ellos a la cima de la montaña inmediata, a esperar la aparición de las Pléyades sobre el horizonte. Redactó luego un artículo sobre esa costumbre, que forma parte de la fiesta de San Juan, celebrada cada 24 de junio. Pero se ciñó a los mecanismos sociales que impulsaban a la gente a formar los grupos, sin prestar atención a la exactitud de las predicciones en sí mismas. Ahí terminó su preocupación por la cuestión. Las notas recogidas en aquel trabajo de campo permanecieron sepultadas en un cajón de la mesa.

Cane se enteró de esa práctica andina mucho más tarde, durante unas vacaciones en Perú en 1994. Allí, a menos de 150 kilómetros del campo de trabajo de Orlove, entabló una conversación con el guía local sobre el tiempo y el clima. El guía le habló de las predicciones, que despertaron su curiosidad. Especialista en climatología, aquello le parecía curiosa-



1. EL CULTIVO DE PATATA EN LOS ALTOS ANDES de Perú y Bolivia. Se trata de una actividad dura, habida cuenta de lo accidentado del terreno y los limitados recursos de la mayoría de los lugareños. Quién sabe si esa misma rudeza movió a los indígenas a idear su sistema de predicción de las lluvias mediante observaciones astronómicas sencillas. Los autores demuestran que el método practicado en esta parte de los Andes, muy fiable, se apuntala sobre una firme base científica.

CORTESIA DE BRUCE WINTERHALDER, *Universidad de California, Davis/American Scientist*

mente coherente. Tomó notas detalladas, entre ellas el nombre de las Pléyades en quechua, el idioma de los indios. De regreso a casa, suscitaba el tema de vez en cuando ante personas que podrían estar interesadas. Cierto día de 1996, un estudiante de segundo ciclo de antropología, conocido suyo, le sugirió que hablara con Ben Orlove. Coincidencias de la vida, Orlove y Cane se habían criado a seis manzanas uno del otro en Brooklyn y habían asistido a las mismas escuelas. Pero desde su adolescencia, hacía un cuarto de siglo, habían perdido el contacto.

Tras un cruce epistolar, comprobaron que compartían las mismas inquietudes. ¿Cómo podía el aspecto de las estrellas guardar relación con la lluvia? ¿Cómo podía la gente recordar siquiera el aspecto de las estrellas de un año a otro? Su creencia, y las prácticas agrícolas consecuentes, parecían tan implausibles como pronosticar el resultado de una batalla examinando los intestinos de un toro sacrificado al efecto.

Mas, por otro lado, tampoco era imposible. En muchas áreas de conocimiento la sabiduría indígena ha mostrado su valía. La aspirina y la quinina, por ejemplo, constituyeron largo tiempo meros remedios populares. Los agrónomos acuden a los campesinos para aprovechar sus conocimientos sobre variedades locales de semillas. Y en muchas partes del mundo, los arquitectos están adoptando los estilos tradicionales de construcción de los pueblos del desierto al reconocer que esos sistemas representan soluciones ahorradoras de energía para los climas áridos. Si hay ejemplos de conocimiento tradicional que tienen una firme base en medicina, agricultura y arquitectura, ¿por qué no en ciencias atmosféricas?

Esas conversaciones no tardaron en confluir en un propósito: preparar un artículo sobre la cuestión. Cane sugirió que Chiang, alumno suyo, se comprometiera en el proyecto. Hijo de un diplomático taiwanés, Chiang se había educado en Sudáfrica y le interesaban los temas relacionados con el desarrollo en los países del Tercer Mundo. En

su tesis de grado abordaba los mecanismos de variabilidad climática en los trópicos; le atraía la perspectiva de aplicar su conocimiento a un problema social.

Así, la conjugación de nuestros conocimientos y experiencia permitía la investigación a desarrollar. Además, en el curso de su trabajo antropológico de campo, Orlove había vivido en zonas rurales del altiplano andino tres años largos y conocía los ritmos de la agricultura de la patata en esa región. Los campesinos sobreviven allí entre los estrechos límites impuestos por la altura y el clima y por los requerimientos básicos de la siembra. Hay un período de crecimiento bien definido durante la estación lluviosa, de octubre a marzo. Al tratarse de los meses más cálidos y de días más largos, son los mejores para la cosecha. Sin embargo, las patatas tienen unos requerimientos muy restrictivos. Si la humedad del suelo es demasiado baja tras la siembra, no se producirán renuevos fuertes. Si el suelo se hiela, dañará las plantas. Los campesinos, que conocen bien la necesidad de adecuadas humedad y temperatura del suelo, plantan el tubérculo al comienzo de la estación lluviosa, para así garantizarle un período largo con las condiciones adecuadas.

El clima y la agronomía no son las únicas preocupaciones que centran la atención de los campesinos a la hora de la siembra. Importan también la organización espacial y temporal de su agricultura. Cultivan cada campo sólo un año o dos; luego, lo dejan en barbecho durante varios años para que el suelo recupere su fertilidad. Este período baldío reduce el impacto de los nemátodos que atacan las patatas. Las plagas disminuyen durante los años de barbecho, mientras que el cultivo continuo aumenta su población, con el riesgo consiguiente de la cosecha.

Esfuerzos coordinados

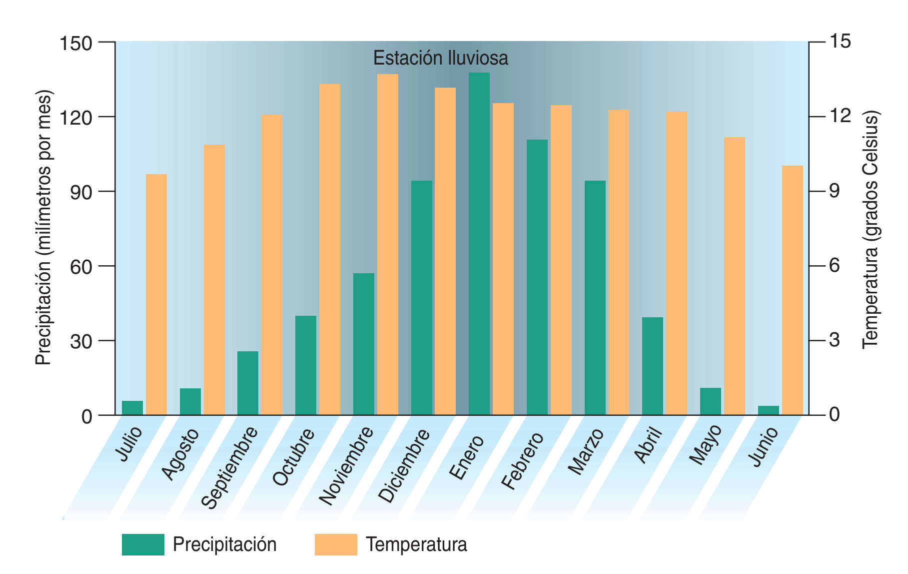
En cientos de aldeas del altiplano peruano y boliviano, las familias sincronizan el ciclo de siembra y barbecho. ¿Por qué? Como los aldeanos apacientan sus ganados en las hierbas y matojos que crecen en las tierras en barbecho, les conviene que los campos cultivados queden juntos, a cierta distancia de los pastos que alimentan a sus ganados de ovejas, vacas y llamas. La coordinación alcanza niveles impresionantes; a menudo, afecta a miles de campos de cultivo que cubren en total muchos kilómetros cuadrados. Puesto que retiran los ganados de los campos en barbecho antes de volver otra vez a cultivarlos, resulta imperativo que se pongan de acuerdo sobre la época de siembra.

Estaba claro que los campesinos andinos tenían un motivo poderoso para conocer la naturaleza de la estación lluviosa próxima. Una predicción acertada reduciría su riesgo de pérdida de cosechas y les ayudaría en la complicada tarea de coordinar la plantación. Abrigábamos la profunda sospecha de que su esquema podría guardar relación con un fenómeno bien conocido del clima tropical: El Niño.

El anormal calentamiento de la superficie del mar en el este del Pacífico ecuatorial que precede a un episodio de El Niño afecta a las pautas del tiempo y del clima en todo el globo. Como este imponente factor de la variabilidad climática natural se halla tan cercano, nos pa-



2. DOCE PUEBLOS (*círculos rojos*) situados en los Andes de Perú y Bolivia constituyeron el foco del estudio de los autores.



3. EL CICLO METEOROLOGICO ANUAL de la región bajo estudio queda reflejado por la temperatura media mensual y la precipitación en cuatro puntos; de ellos los autores pudieron obtener datos fidedignos. La estación lluviosa (*fondo oscuro*) abarca de octubre a marzo.

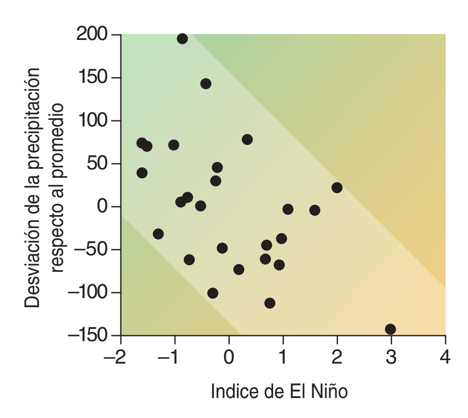
recía plausible su incidencia en el altiplano andino, influyendo sobre la precipitación durante los meses lluviosos (octubre a marzo) y repercutiendo —no sabíamos cómo— en la luminosidad de las Pléyades en junio, mucho antes de que comenzara la estación lluviosa.

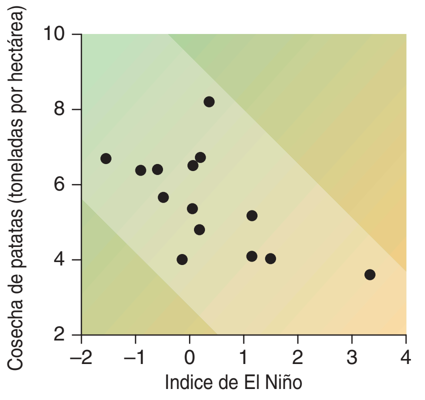
¿Cómo descifrar el misterio? Había que empezar por coger una información completa de lo que sucedía. Hicimos un vaciado exhaustivo de la bibliografía, importante y menor; rebuscamos antiguas colecciones de folclore, compendios de técnicas indígenas y tesis doctorales inéditas. A partir de esas fuentes, establecimos una lista de doce aldeas distribuidas por toda una región contigua de los Andes, donde los campesinos miran al firmamento en junio para predecir la lluvia que caerá meses después.

Sus creencias, según descubrimos, guardaban estrechas semejanzas de un lugar a otro. Todos los aldeanos declaran que las Pléyades son las estrellas que hay que observar. Algunos afirman que miran para ver si el cúmulo estelar brilla o no con intensidad. Otros mencionan que también consideran si las Pléyades son visibles antes del 24 de junio o si no aparecen hasta la fiesta de san Juan o incluso después. En algunos pueblos valoran el tamaño del cúmulo.

Lo curioso del caso reside en lo siguiente: todas las observaciones se hallan relacionadas con la claridad relativa de la atmósfera. Así, el "tamaño" de las Pléyades varía con la transparencia atmosférica, porque, cuando las estrellas más débiles se hacen visibles, el número de miembros de las Pléyades aumenta de 6 a 11 y crece en un 25 por ciento el diámetro aparente del cúmulo. En dos pueblos, los campesinos mencionaron que ciertas estrellas parecen "romperse" cuando las condiciones de observación son óptimas. Interpretamos sus palabras en el sentido de que pueden percibir estrellas adicionales y débiles junto a otras de brillo mayor.

Sólo uno de los atributos observados nos dejó confusos: los aldeanos afirmaban que la estrella más luminosa del cúmulo podía alterar su posición con respecto a las otras. Aunque una estrella brille más que el resto de la formación, nunca resolvimos por qué podría hallarse en lugares diferentes. Tal vez parecía alterar su posición relativa en las noches claras, cuando se distinguen las estrellas más débiles.





4. LA LLUVIA ESTIVAL en la zona bajo estudio, expresada aquí como desviación respecto al valor medio, varía en proporción inversa a la intensidad de las condiciones de El Niño, señaladas mediante un índice de rigor (*arriba*). En consecuencia, la cosecha de patatas en esta región varía en proporción a la intensidad de El Niño (*abajo*).

American Scientist

Nos llamó la atención la fe que los aldeanos ponen en tal observación de estrellas, que les movía a actuar de acuerdo con lo contemplado. En los años en que las Pléyades se muestran brillantes, grandes y numerosas, entre otras condiciones favorables, plantan la patata en la fecha acostumbrada. Pero si aparecen mortecinas, pequeñas y escasas, es decir, desfavorables, prevén que las lluvias llegarán tarde y dispersas; en consecuencia, demoran varias semanas la siembra. Este recurso a la predicción para cambiar la fecha de siembra quedó patente en diez de los doce pueblecitos. Los informes que teníamos de los otros dos no proporcionaban suficiente información sobre las actividades allí emprendidas, después de junio, para determinar si los campesinos modificaban o no el momento de sembrar.

La exactitud cuenta

¿Ayudaba este método tradicional a los campesinos? Ahí residía el nudo de la cuestión. Para desatarlo, necesitábamos contar con registros de las fluctuaciones de la precipitación y de la cosecha. Habría que explorar, luego, un conjunto de causas naturales, relacionadas con El Niño, que pudieran influir sobre la observación directa del firmamento.

La primera tarea nos obligaba a reunir series de datos atmosféricos que complementaran la información antropológica que ya habíamos recogido. Chiang examinó los datos meteorológicos andinos extraídos de boletines de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los EE.UU. Tales series de datos (en particular los relativos a países en vías de desarrollo) resultan a menudo demasiado fragmentarias para poder examinar variaciones anuales secuenciales, adolecen de vacíos apreciables y son generalmente poco fidedignas.

Pese a todo, Chiang pudo sacar cuatro estaciones representativas de la región donde se realizan los pronósticos: Ayacucho, Cuzco y Juliaca en el Perú y La Paz en Bolivia. De cada estación había datos bastante completos desde julio de 1962 hasta junio de 1988. Estas observaciones meteorológicas confirmaban lo que habíamos supuesto. Existía una estrecha vinculación entre un episodio de El Niño y el carácter de la precipitación: la lluvia era decididamente más baja durante los años de El Niño. La asociación se tornaba manifiesta para los tres meses de precipitación más alta (diciembre, enero y febrero). Importa subrayar que la lluvia de octubre también disminuye con El Niño, lo que sugiere que la estación lluviosa comienza tarde en esos años.

Algo más difícil resultó recabar información sobre las cosechas de patatas. Los campesinos, que viven dispersos en remotas aldeas, no in-

forman sobre sus cosechas a ninguna organización. Sin embargo, el Centro Internacional de la Patata en Lima, uno de los principales centros internacionales de investigación agrícola, había recogido datos sobre toneladas cosechadas y la superficie plantada en diversas provincias del departamento de Puno en Perú; para nuestra fortuna, en el mismo centro de la región de interés. Las estadísticas reflejaban una estrecha relación entre la variabilidad climática y la producción patatera, apreciablemente más baja en los años de El Niño. Dada la sensibilidad del tubérculo a la sequía, entraba en lo razonable que acusara los efectos de las bajas precipitaciones que trae El Niño. Las temperaturas superiores a lo normal durante un episodio de El Niño repercuten también en la cosecha.

Habiendo vinculado, con episodios de El Niño, la precipitación y las cosechas, emprendimos la siguiente tarea: buscar algún factor atmosférico que relacionase el fenómeno climatológico con el brillo aparente de las Pléyades. Se dispone en astronomía de un sistema de ecuaciones bien establecido que describe el efecto de diversas variables atmosféricas sobre el brillo aparente de las estrellas. Por hallarse las Pléyades cerca del horizonte cuando se realizan las tradicionales observaciones, los aldeanos perciben la formación a través de una capa de aire mucho más espesa de lo que sería si el cúmulo estelar se encontrara próximo al zenit. Por consiguiente, la claridad atmosférica constituye un factor importante.

Consideramos diversas hipótesis. Investigamos primero la posibilidad de que, en los años de El Niño, contuviera más polvo el aire que soplaba sobre los Andes. Joe M. Prospero y su grupo, de la Universidad de Miami, habían mostrado con anterioridad que los vientos alisios transportaban grandes cantidades de polvo sahariano a través del Atlántico Norte tropical a América cada año; había indicios de que El Niño modulaba dicho transporte. Con la ayuda de Reha Calmur, del Instituto Goddard de Ciencias del Espacio, examinamos las observaciones de los satélites, pero los resultados fueron decepcionantes. Había muy pocos signos que respaldaran la presencia de una cantidad apreciable de polvo sobre los Andes. Además, en razón de su peso, el polvo atmosférico tiende a concentrarse en la zona baja —los primeros pocos kilómetros sobre el nivel del mar—, por lo que no resultaba probable que el polvo sahariano afectara al altiplano andino.







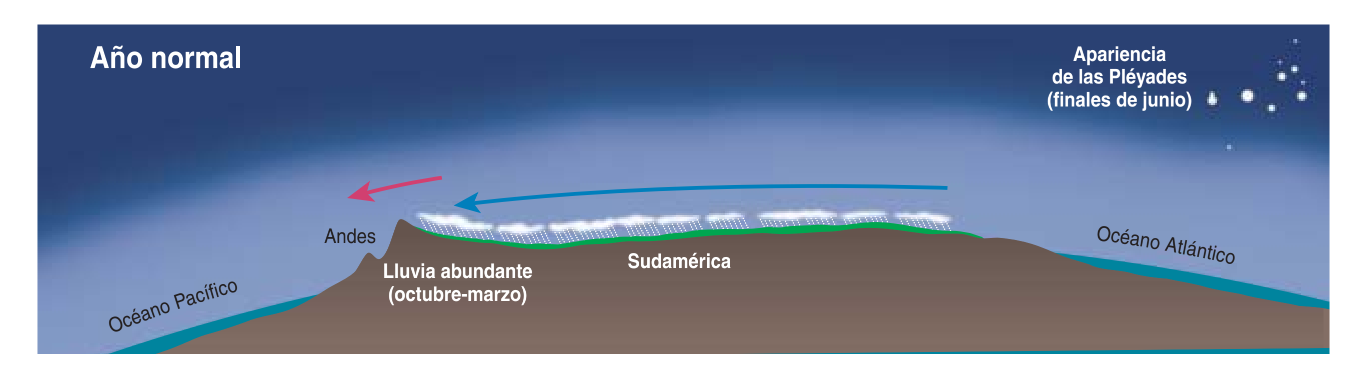
5. REPRESENTACION SIMULADA de las Pléyades. Así podrían aparecer durante un año normal, cuando los cirros apenas afectan al cielo nocturno; mostraría 11 estrellas visibles (*arriba*). Observando el cúmulo estelar durante un año de El Niño, cuando abundan los cirros altos, se verían menos estrellas (*abajo*). Las condiciones entre esos extremos permitirían, a su vez, observar un número intermedio de estrellas (*centro*).

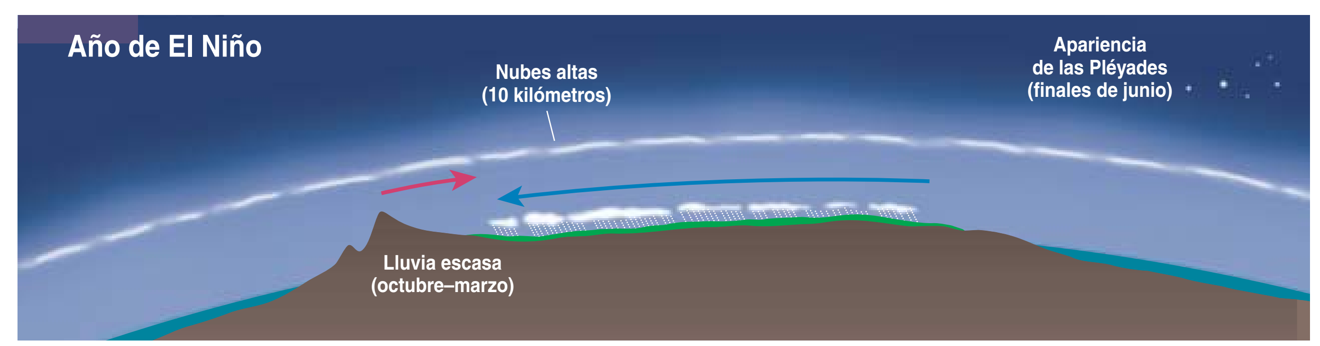
American Scientist

Por indicación de Gene Rasmussen, meteorólogo de la Universidad de Maryland, decidimos centrarnos en otro agente posible: las nubes altas. Estas podrían parecer un candidato improbable. Después de todo, la mayoría de las nubes adquieren tal espesor, que bloquean la luz de las estrellas. Y el pequeño ángulo de visión con que los predictores andinos observan las Pléyades significa que la luz de las estrellas ha de atravesar una buena porción atmosférica. Pero las nubes tropicales a alturas de más de diez kilómetros no son nubes típicas, sino cirros altos. Aunque esas tenues nubes dispersan la luz, son tan finas que no se distinguen a simple vista. Su *espesor óptico* (equivalente a la fracción de luz atenuada al pasar a través de la nube) es del orden del 3 por ciento o menor. De aquí que se llamen frecuentemente "subvisuales".

Esta hipótesis pareció dar buen resultado. Las cantidades de nubes altas, compiladas por el Proyecto Internacional de Climatología de Nubes por Satélite (*International Satellite Cloud Climatology Project,* ISCCP), mostraron un aumento durante los años de El Niño en la región al nordeste del altiplano andino (la dirección tomada al observar las Pléyades) a fines de junio.

La prueba del ISCCP, aunque sugerente, no era definitiva; por una razón: en ese conjunto de datos, la categoría de nubes altas incluye no sólo cirros finos, sino también otros tipos. Pudimos, sin embargo, aprovechar las mediciones realizadas por un sensor espacial muy indicado para nubes situadas por encima de 10 kilómetros: el Experimento de Aerosol y Gas II (*Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II,* SAGE II), instrumento transportado a bordo del Satélite de Balance de Radiación de la Tierra (*Earth Radiation Budget Satellite)*, que evalúa el espesor óptico midiendo la intensidad de la luz solar que atraviesa la atmósfera terrestre a un ángulo rasante y escapa nuevamente al espacio. A diferencia de la construcción de imágenes empleada por el ISCCP, que





6. AUNQUE LOS VIENTOS ESTIVALES a alto nivel que soplan sobre los Andes son variables, en un año normal (*arriba*) cursan por término medio de este a oeste (*flecha roja*). Estos vientos traen aire húmedo que se mueve al oeste de la cuenca septentrional del Amazonas y después hacia el sur a lo largo de los flancos de la cordillera (*flecha azul*) ascendiendo hacia los Andes propiamente dichos. El Niño provoca que los vientos estivales a alto nivel soplen, por término medio, de oeste a este, lo que inhibe la aportación de este aire húmedo y da lugar a una estación seca para los campesinos de la región (*abajo*). Sin embargo, éstos pueden pronosticar la cantidad de lluvia que cabe esperar durante el verano, usando como guía el aspecto de las Pléyades a mediados de invierno: como El Niño también produce una capa atenuadora de finas y altas nubes sobre gran parte de los trópicos, las Pléyades se perciben más tenues, pronóstico de tiempo seco.

American Scientist

observa la atmósfera directamente hacia abajo, el método del SAGE II puede detectar nubes de una finura sutil.

Un análisis previo de estos datos del SAGE II, publicados por Geoffrey S. Kent y su equipo, de la Corporación de Ciencia y Tecnología de Washington, D.C., sugería que los cirros subvisuales revelaban, en su variación, una estrecha dependencia de El Niño. Basados en sus resultados y teniendo en cuenta el ángulo de visión de los campesinos andinos, estimamos que la atenuación resultante de las Pléyades para un año de El Niño, comparado con un año normal, se hallaba entre las magnitudes astronómicas 0,1 y 1, esto es, el brillo relativo del cúmulo estelar cambiaba en un factor entre 1,1 y 2,5. Así, esas nubes altas podían mitigar en cuantía notable la luminosidad de las Pléyades; ahora bien, ni siquiera cuando alcanzan mayor espesor hacen desaparecer el cúmulo.

Fue una suerte disponer de los datos del ISCCP y los del SAGE II; cualquiera de ellos por sí solo no habría bastado para decidir: el conjunto de datos del ISCCP tenía suficiente resolución temporal y espacial para vincular las nubes altas con El Niño, pero carecía de sensibilidad para detectar cirros finos. Por el contrario, los datos del SAGE II gozaban de la sensibilidad necesaria para los cirros finos, pero les faltaba resolución espacial y no cubrían un intervalo temporal de amplitud conveniente. Tomados en conjunto, sin embargo, apuntan a las nubes altas y delgadas como el eslabón entre las observaciones de los campesinos y El Niño.

Pese a ello, exploramos otras posibles influencias atmosféricas sobre el brillo aparente de las Pléyades. En particular, aprovechamos la experiencia de los astrónomos aficionados para descubrir otros plausibles mecanismos. Una de tales posibilidades consistía en una variación del contenido atmosférico de vapor de agua; otro, en la turbulencia atmosférica, causante de la apariencia borrosa de las estrellas. Resulta que ambos parámetros aumentan durante un episodio de El Niño, tendiendo a hacer más tenues las Pléyades. Además, los niveles altos de vapor de agua y una mayor turbulencia van generalmente asociados a la formación de nubes. Sin embargo, el efecto directo de esas variables sobre el brillo de las Pléyades es pequeño, comparado con la nubosidad.

Hay otra razón para pensar que las nubes altas y subvisuales rigen los pronósticos. Tales nubes duran mucho; su número no varía tanto como el de las nubes más bajas, que cambian diariamente con el tiempo atmosférico. Por consiguiente, los campesinos que observan las Pléyades una sola noche pueden obtener, con probabilidad, una estima muy aproximada de la cantidad típica de nubes altas, dato con-

veniente para deducir las condiciones climáticas sobre el Pacífico oriental, que controlan si será un año normal o uno de El Niño.

La ciencia ignora cómo se forman las nubes subvisuales y por qué su cobertura sobre los trópicos aumenta en los años de El Niño. Quizá se deba a las corrientes de convección atmosféricas, que arrastran la humedad hasta la alta troposfera, donde el vapor de agua se condensa en cristales de hielo creando cirros altos. Se sabe que tal actividad convectiva aumenta sobre el Pacífico tropical durante el episodio de El Niño. Por tanto, se pueden formar allí entonces más nubes subvisuales que, arrastradas por los fuertes vientos a alto nivel, se extienden sobre el resto de los trópicos, incluido el altiplano andino.

Desde hace tres años, cuando iniciamos nuestra investigación científica sobre este tema, han venido agregándose nuevos datos ligados a este fenómeno y su relación con las lluvias andinas. En particular, un estudio empírico del equipo encabezado por Mathias Vuille, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Apoyados en datos más completos de estaciones de observación y análisis refinados, ha puesto la vinculación entre El Niño y la lluvia andina sobre una base estadística más sólida.

En otro trabajo destacable, René Garreaud y Patricio Aceituno, de la Universidad de Chile, proponían un mecanismo muy interesante sobre la repercusión de El Niño, a través de diversos indicios, en los altiplanos andinos. De acuerdo con ambos autores, durante un episodio de El Niño, el flujo de viento sobre los Andes cursa más a menudo de oeste a este que en sentido inverso. Esto impide, en apreciable medida, que el aire húmedo sobre las laderas y las tierras bajas al este de las montañas ascienda hasta el altiplano. Al constituir éste el principal camino para transportar la humedad a la región, disminuye la precipitación.

Para resumir, el brillo aparente de las Pléyades a fines de junio guarda una correlación real con la lluvia durante la estación de crecimiento de la patata en los siguientes meses, de octubre hasta marzo. Por lo que sabemos, ésta es la primera vez que se ha ofrecido una explicación científica de una práctica meteorológica popular. Se trata de un caso de enorme interés por su singularidad; los campesinos de países más desarrollados no acostumbran recurrir a las predicciones climáticas estacionales. En los Estados Unidos, por ejemplo, menos del diez por ciento de los campesinos aprovechan las predicciones estacionales para modificar sus operaciones.



7. EN VERANO, EL AIRE HUMEDO de la cuenca amazónica asciende hasta las alturas andinas, transportando humedad. Este proceso queda evidenciado por las nubes que se ven en la fotografía del paso montañoso en la escarpadura oriental, que también muestra una iglesia situada a unos 4500 metros sobre el nivel del mar.

La tarjeta de tanteo

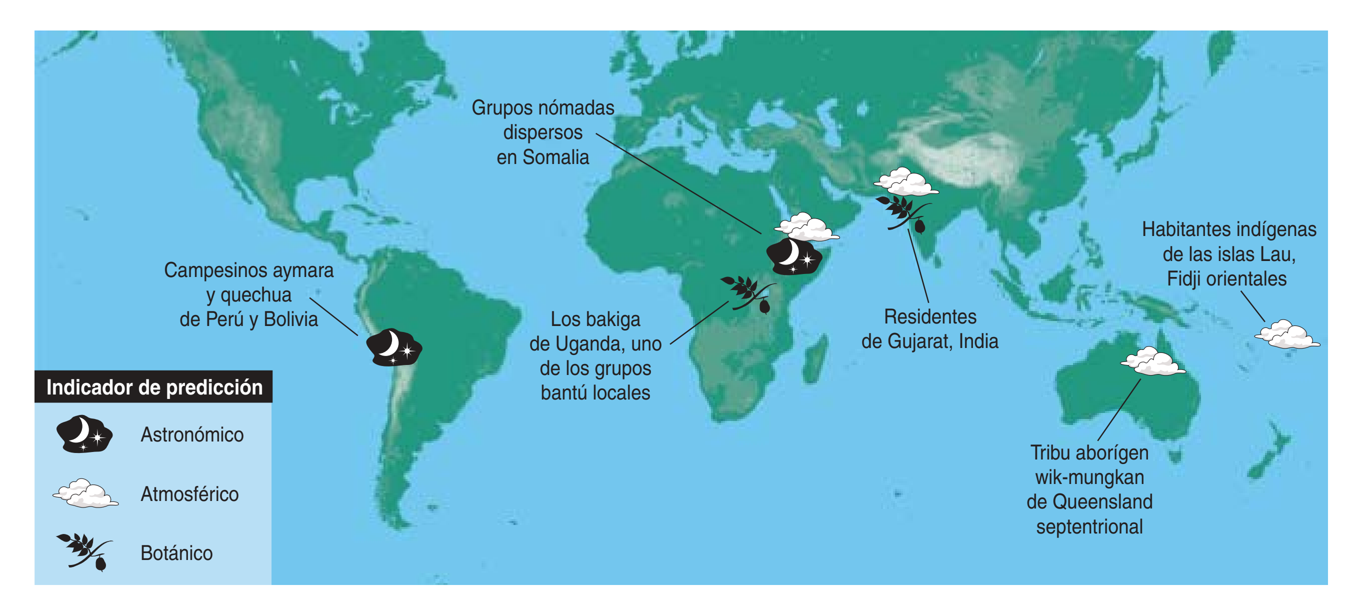
La resolución de un enigma suele plantear otros. Nuestra investigación ha analizado cuatro puntos principales. Concierne el primero a la exactitud de las predicciones. Nuestra valoración es todavía incompleta. El coeficiente de correlación entre cirros altos en las horas anteriores al amanecer a fines de junio (los responsables de atenuar las Pléyades) y la precipitación en la siguiente estación lluviosa (determinada a partir de las observaciones de satélites) se cifra en –0,3, lo que corresponde a una exactitud de la predicción en torno al 65 por ciento. Este valor excede la exactitud de las modernas predicciones científicas, a similar plazo, para la precipitación sobre las altiplanicies andinas, que oscila entre 55 y 60 por ciento.

Ni que decir tiene que las observaciones a simple vista de las Pléyades suministran una medida incompleta de la cantidad de nubes

Pueblo	Año	Indicador en junio	Predicción en junio	Resultado en el año siguiente
Sicuani	1973	Estrellas débiles	Mala cosecha	Mala cosecha
Cuyo-cuyo	1986	Estrellas débiles	Mala cosecha	Mala cosecha
Cuyo-cuyo	1987	Estrellas brillantes	Buena cosecha	Buena cosecha
Chayantaka	1991	Aparición tardía	Mala cosecha	Mala cosecha
Chayantaka	1992	Estrellas grandes y brillantes	Buena cosecha	Buena cosecha

8. SE HAN DOCUMENTADO cinco predicciones basadas en la observación de las Pléyades. Todas ellas resultaron correctas.

CORTESIA DE BRUCE WINTERHALDER, *Universidad de California, Davis (arriba)/American Scientist*



9. GRUPOS LOCALES E INDIGENAS de diversas partes del mundo tratan de pronosticar las condiciones meteorológicas a largo plazo, recurriendo a sencillas observaciones de su entorno. Los ejemplos representados aquí han atraído la atención de los autores, que están reuniendo información acerca de tales prácticas en todo el mundo. Curiosamente, tales esquemas predictivos parecen ser más corrientes en latitudes tropicales. Estas predicciones muestran qué aspectos del clima esperan discernir quienes las practican y en qué época unas predicciones fidedignas serían de utilidad para ellos.

altas. Cabe, pues, preguntarse sobre el valor real de las predicciones hechas por los campesinos. Hemos encontrado sólo cinco casos en los que los investigadores tomaron nota de las predicciones de junio y después siguieron allí o volvieron al punto de estudio para ver si las predicciones se cumplían. En los cinco casos, las predicciones fueron correctas. Como sólo hay dos categorías —años buenos y años malos, en aproximadamente igual número—, esta situación es similar a anunciar que uno puede predecir de qué lado caerá una moneda y acertar en cinco casos de cinco. Si la proporción de años buenos y malos es la misma, tal nivel de exactitud aparecería por azar sólo alrededor de un tres por ciento del tiempo.

Ciertos descubrimientos recientes de un grupo de investigadores de la Universidad de Missouri apoyan también la validez del método de los campesinos andinos. Estudiaron pueblos indígenas alrededor del lago Titicaca, en la misma región de nuestro estudio. Para hacer sus predicciones acerca de la próxima estación lluviosa, los aldeanos de esta región observan las Pléyades, pero toman también en consideración otros factores: así, el momento de la floración y el comportamiento de los pájaros. En esta zona, los campesinos pronosticaron correctamente la sequía de 1989-90 y las lluvias normales de 1990-91 y 1997-98, las tres estaciones lluviosas que el grupo de científicos analizó con mayor detalle.

Una muestra de sólo cinco —u ocho, si se incluyen los casos del Titicaca— no basta para proporcionar una cifra firme de la exactitud de las predicciones. Cabe esperar su refinamiento en los próximos años: el Ministerio de Agricultura peruano está emprendiendo un proyecto para estudiar las predicciones locales y su exactitud.

Este y otros proyectos similares podrían ir más allá de la mera comparación entre el sistema moderno y el tradicional. Podrían explorar sus complementariedades. Los físicos del aire podrían beneficiarse al centrarse en los fenómenos que los pueblos indígenas observan (aquí, las nubes altas y finas en una región específica), de igual modo que los campesinos podrían tomar en consideración atributos de la atmósfera distintos de los que ya observan. Cada grupo podría aprender del otro, a imagen de lo que acontece en medicina; los médicos aprovechan la medicina tradicional y los curanderos visitan las farmacias.

El punto segundo atañe al origen de esas prácticas. Su amplia distribución refleja una larga historia, profundamente enraizada en otras creencias indígenas de los Andes. Los aldeanos encuentran razonable que las Pléyades sean grandes en los años en que las lluvias y las cosechas son abundantes. Sus convicciones están basadas en la hipótesis de coherencia y correspondencia de muchas características en el mundo natural y en la noción de que los años son unidades temporales definidas. Las Pléyades se encuentran entre los primeros signos que pueden observar en el año nuevo, que en sus sistemas de cálculo se inicia alrededor del solsticio de invierno.

Nuestra primera fecha firme de esta forma de predicción se remonta a finales del siglo XVI. Una fuente escrita hacia 1600, relativa al extremo NO de la zona que contiene los doce pueblos, incluye el siguiente texto en su lista de estrellas: “Las siguientes son las que llamamos Pléyades; si aparecen muy grandes, la gente dice: ‘Este año tendremos abundancia’. Pero si salen muy pequeñas, la gente dice: ‘Este será un año muy duro’”.



El año 1600 no dista mucho de otra efeméride, la de 1532, cuando los españoles iniciaron la conquista del imperio inca. Nada impide suponer que estas predicciones datan de tiempos precolombinos y representan una supervivencia de antiguas tradiciones andinas. Varias clases de indicios apoyan la hipótesis. De entrada, la finura de los conocimientos astronómicos de los incas; aquel pueblo consideraba que las Pléyades constituían una formación muy importante del firmamento. Además, los astrónomos incas observaban el cielo preauroral a fines de junio, alrededor de la época del solsticio de invierno, como parte de su *Inti Raymi* o festival del Sol. Por sugerentes que sean, estos indicios sólo permiten establecer una conjetura.

El tercer punto se centra en el carácter singular, único, de esta práctica. Sabemos de otras cinco culturas que mantenían idénticas creencias. Pero esta cifra puede subestimar el número real de estrategias predictivas, carentes de base documental suficiente. Sospechamos que, con el tiempo, el estudio científico de las culturas indígenas descubrirá un número mucho mayor de tradiciones para pronosticar el tiempo.

Hasta la fecha, sólo unas pocas tradiciones de ésas se han sometido a prueba. Purshottambhai Kanani, agrónomo de Gujarat, ha examinado las creencias locales desde mediados del decenio de 1990. En el intervalo temporal abarcado en su estudio, la variación en la floración del árbol del chubasco dorado (*Cassia fistula*) ha dado buen resultado para predecir el comienzo del monzón, que tuvo lugar muy cerca de la creencia de los campesinos según la cual el máximo de floración ocurre un mes y medio antes del inicio de las lluvias. Los ecólogos vegetales han establecido relaciones entre la variabilidad climática y el tiempo de apertura del capullo, la floración y otros indicadores fenológicos; podemos admitir que los lugareños observaran tales nexos.

Los aldeanos en la región de estudio de Kanani también recurren a la variabilidad atmosférica para pronosticar los monzones. De acuerdo con su cultura tradicional, los vientos del norte y del oeste en el festival de Holi, en la Luna llena de marzo, indican que las lluvias monzónicas, que llegan en junio o julio, serán suficientes o abundantes, mientras que los vientos del este en esa fecha pronostican una precipitación escasa. En los seis años abordados por Kanani, estas predicciones demostraron ser en general correctas. Aunque demasiado pronto para anticipar qué porcentaje de creencias meteorológicas populares se confirman con la recogida sistemática de datos objetivos, parece improbable que el caso andino sea único.

Por último, se trata de valorar la utilidad del estudio de tales predicciones indígenas. Desde la perspectiva de la investigación básica, importa documentar la capacidad del hombre para observar las regularidades de la naturaleza y modificar de acuerdo con ellas sus actividades de subsistencia. Esta capacidad, componente clave de muchas culturas, ha contribuido a convertirnos en una de las especies más ampliamente distribuidas sobre el planeta. Dentro del campo de la antropología, estas predicciones forman parte del más amplio tapiz del conocimiento popular acerca del medio, campo de floreciente interés en años recientes.

Desde la perspectiva de la investigación aplicada, el estudio de las predicciones indígenas se encuadra en una red de extensión creciente que pone en conexión a investigadores del clima, responsables políticos, administradores y ciudadanos. Las predicciones demuestran que las poblaciones locales no se hallan resignadas a aceptar, por fatal destino, la variabilidad climática como una dura realidad. Por el contrario, buscan información que puedan aplicar para adaptarse. Las estrategias empleadas señalan la anticipación con que se requiere la predicción y ofrecen apuntes sobre las condiciones climáticas que los lugareños desean conocer por adelantado. Esta información puede ayudar a los meteorólogos a preparar predicciones útiles y puede mejorar la comunicación entre los productores y los consumidores de predicciones científicas modernas. Puede contribuir también a las diversas respuestas ante el cambio climático que se debaten ahora. Observadores próximos de la variabilidad climática, esos pueblos deberían ser escuchados.

Los autores

Benjamin S. Orlove, profesor del departamento de ciencia y política ambientales en la Universidad de California en Davis e investigador adjunto del Instituto Internacional de Predicción del Clima de la Universidad de Columbia, se recibió de doctor en antropología por la Universidad de California en Berkeley en 1975. Desde hace más de un decenio, ha centrado su tema de estudio en los pueblos indígenas de los Andes. **John C. H. Chiang**, doctorado por la Universidad de Columbia en 2001 con una tesis sobre la dinámica climática, comparte la docencia en la Universidad de Berkeley con su trabajo en el Instituto Conjunto para el Estudio de la Atmósfera y el Océano, adscrito a la Universidad de Washington en Seattle. **Mark A. Cane**, que obtuvo el grado de doctor en meteorología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1975, ocupa la cátedra G. Unger Vetlesen de la Universidad de Columbia.

Bibliografía complementaria

EVERYTHING IS WRITTEN IN THE SKY!: PARTICIPATORY METEOROLOGICAL ASSESSMENT AND PREDICTION BASED ON TRADITIONAL BELIEFS AND INDICATORS IN SAURASHTRA. P. R. Kanani y A. Pastakia, en *Eubios Journal of Asian and International Bioethics*, vol. 9, págs. 170-176; 1999.

FORECASTING ANDEAN RAINFALL AND CROP YIELD FROM THE INFLUENCE OF EL NIÑO ON PLEIADES VISIBILITY. B. S. Orlove, J. C. H. Chiang y M. A. Cane, en *Nature*, vol. 403, págs. 68-71; 2000.

INTERANUAL RAINFALL VARIABILITY OVER THE SOUTH AMERICAN ALTIPLANO. R. D. Garreaud y P. Aceituno, en *Journal of Climate*, vol. 12, págs. 2779-2789; 2001.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Estrellas de las nieves

Tras aquella nube, vino otra que sólo produjo pequeñas rosetas o ruedas de seis dientes redondeados.
— René Descartes, *Los meteoros*, 1637

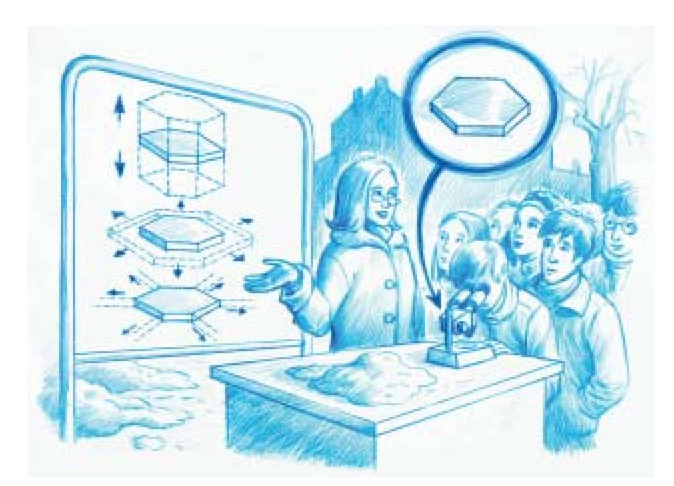
Cada copo de nieve es único, sea su forma la de placa, estrella, botón o cinta. Es una peculiaridad que intrigó a los sabios; los primeros, Johannes Kepler y René Descartes. Hoy se conocen los mecanismos que rigen el crecimiento de los cristales de hielo. Para revelarlos, vamos a seguir, desde la infancia a la madurez, el crecimiento de un "ovillo de hielo", como decía Descartes. Comprenderemos así mejor la increíble variedad de la estructura de los copos y el origen de los ángulos de 60º y 120º que una y otra vez exhiben.

Un copo de nieve nace con tres padrinos: el vapor de agua, la temperatura y el polvo. Para empezar, el vapor de agua debe ser lo bastante denso en la atmósfera para que se condense a la primera ocasión. La condensación toma la forma de hielo, cuando la temperatura es inferior a 0 ºC, a partir de una densidad mínima de vapor de agua en la atmósfera, o densidad de saturación. Esta depende de la temperatura; vale cinco gramos por metro cúbico a 0 ºC, pero sólo un gramo por metro cúbico a –18 ºC. Finalmente, también hace falta una mota de polvo. El crecimiento cristalino se inicia a partir de una semilla: una mota o un microcristal de hielo. Cuando la atmósfera está muy limpia, no se forma fácilmente un cristal microscópico. La densidad de vapor de agua podría incluso llegar a cuatro veces su valor de saturación sin que se formase ni una traza de hielo. Pero a un cierto nivel de sobresaturación, los choques entre las moléculas de agua acaban por crear agregados de volumen suficiente para que sirvan de soporte al crecimiento cristalino. En las nubes de nieve, el vapor de agua rara vez es tan denso: por ello, muy a menudo, el crecimiento del hielo se inicia en la superficie de motas de polvo atmosférico. Las nevadas espesas de Navidad son, en esencia, lluvias de motas atmosféricas arrastradas hasta caer por sus ropas de hielo.

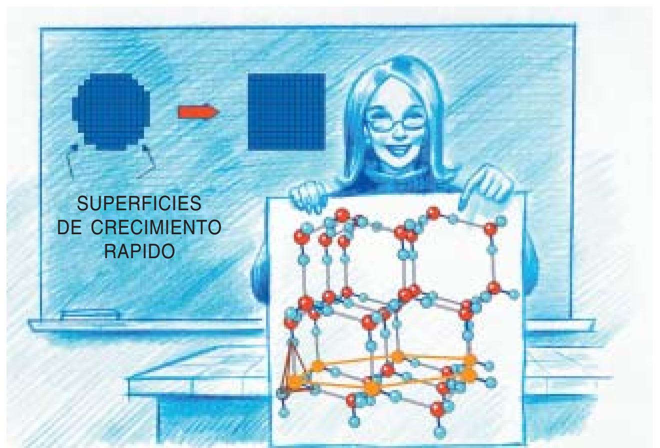
Semillas atmosféricas

Esas motas atmosféricas son, por ejemplo, de mica o de arcilla. Tales partículas constituyen excelentes "núcleos de crecimiento", ya que su superficie está hecha de átomos de oxígeno dispuestos según una estructura cercana a la del hielo. Una mota resultará tanto más activa cuanto mayor sea; las partículas de una centésima de milímetro se cubren de hielo en cuanto se alcanza la saturación. En cambio, las motas submicroscópicas que se hallan por encima de los 4000 metros de altitud sirven de núcleos sólo si la atmósfera está muy sobresaturada.

El cristal de hielo inicial mide en torno a una centésima de milímetro; presentará una forma vagamente esférica incluso aunque su superficie sea muy irregular a escala molecular. El crecimiento subsiguiente reduce muy rápidamente esa rugosidad, pues las moléculas de agua se fijan preferentemente allá donde puedan establecer con sus semejantes el mayor número de enlaces: en una cavidad. Poco a poco, el crecimiento genera planos cristalinos y determina las superficies y las orientaciones de esos planos hasta producir una forma regular y simétrica. ¿Cuál es la causa molecular de ese comportamiento? Para las presiones y temperaturas atmosféricas, cada molécula de agua se halla en el centro de un tetraedro formado por sus cuatro vecinas y la red cristalina del hielo posee simetría hexa-



1. En un estadio temprano de su crecimiento un copo de nieve adquiere la forma de un prisma hexagonal, que luego crecerá según tres posibles modelos.



BRUNO VACARO

2. En el seno del hielo, las moléculas de agua tienden a crear el mayor número de enlaces posible, lo que explica la formación de los planos cristalinos.

gonal (se entiende esa geometría mirando los tetraedros “desde arriba”: su proyección forma triángulos equiláteros; adosándolos se crean hexágonos). El cristal resultante del crecimiento es un prisma hexagonal; sus bases superior e inferior son hexágonos (de ahí los ángulos de 120 y 60 grados) y las caras laterales, rectángulos. El tamaño inicial de este prisma es del orden de un quinto de milímetro: incluso cuando el crecimiento genere otra forma, se integrarán hexágonos en la estructura.

En la etapa de crecimiento siguiente, la naturaleza de la superficie del hielo desempeña un papel predominante. Las moléculas que la constituyen forman una capa desordenada, casi líquida. A escala microscópica, recuerda la estructura de los planos cristalinos subyacentes. A nuestra escala, “lubrica” el hielo y lo vuelve deslizante; también se le debe que los copos se apelmacen cuando hacemos bolas de nieve. Sabemos, no obstante, que con mucho frío es difícil patinar o hacer bolas de nieve, observación que revela que la capa casi líquida no existe cuando el frío es excesivo. La capa, de espesor más o menos el de una molécula cuando aparece hacia –12 ºC, aumenta con la temperatura. Hacia 0 ºC, penetra en el mismo corazón del cristal, y el hielo se licúa. Como la superficie del cristal es casi líquida, las moléculas que en ella se depositan pueden desplazarse hasta el sitio más favorable (una cavidad) antes de fijarse. Según la temperatura, ese proceso de difusión es más o menos lento, lo que afecta a la forma que adquiere el copo.

Historia y geometría

Así, los copos, idénticos en un principio, adoptan luego una multitud de formas según las condiciones atmosféricas. Predominan tres tipos de crecimiento. Los dos primeros están gobernados por la temperatura, de tal modo, que según el valor de ésta, “medrarán” más las bases hexagonales o las caras laterales. Entre –10 ºC y –5 ºC, el cristal crece más por las bases que por los lados; por ejemplo, a –6 ºC crecen dos veces más deprisa y el copo se asemeja a una columna. En cambio, a temperaturas superiores a –5 ºC e inferiores a –10 ºC, se crece más deprisa por las caras que por las bases; por ejemplo, a –13 ºC, a 0,5 milésimas de milímetro por segundo, el cuádruple que las bases. Un copo de nieve que permanezca a esa temperatura durante todo el crecimiento adquirirá la forma de una placa hexagonal.

El tercer tipo de crecimiento está regido por la concentración en agua de la atmósfera donde se forma el copo. Cuanto mayor sea la sobresaturación, más rápido crecerá el cristal. Cuando la velocidad de crecimiento aumenta demasiado o cuando el cristal ha madurado, las moléculas de agua que se depositan apenas tienen tiempo de migrar hacia la superficie del cristal antes de fijarse. Lo mismo pasa cuando a temperatura muy baja no hay capa casi líquida. Entonces, como ya no migran, las moléculas de agua se fijan cerca de los lugares donde toparon con la superficie del cristal. ¿Y cuáles son los más frecuentes? Las aristas. Ese comportamiento se autoamplifica, pues cuanto más crecen las aristas, más lugar ofrecen y tanto más se acelera su crecimiento. A través de este mecanismo se desarrollan las estrellas de seis brazos (las “ruedas de seis dientes redondeados” de Descartes).



3. Cuando no hace frío intenso, los copos de nieve o el hielo se cubren de una capa de agua casi líquida. Sin ésta, no sería posible hacer bolas de nieve ni deslizarse sobre los charcos helados.

El mismo mecanismo funciona también de manera más complicada. Así, ocurre que los brazos a su vez se ramifican, dividiéndose en brazos menores, que asimismo se dividen... El origen de esa maravillosa ramificación y de su regularidad fue explicado en 1964 por Mulins y Sekerka, que se interesaban por las numerosas estructuras ramificadas observables en metalurgia. Demostraron que una superficie plana que crece con excesiva rapidez se cubre de gibas tanto menos separadas cuanto mayor es la velocidad de crecimiento. En otras palabras, la difusión rápida de partículas hacia la superficie favorece el crecimiento de las gibas situadas a una cierta distancia unas de otras. Si el crecimiento prosigue al mismo ritmo, las gibas se hacen mayoría, de tal modo que una red regular de asperezas no tarda en cubrir la superficie. En el caso de un copo, la subdivisión de sus brazos sólo interviene cuando la velocidad de crecimiento permite que la distancia entre dos agujas (las gibas) nuevas sea inferior a la separación entre las agujas ya formadas.

La caída

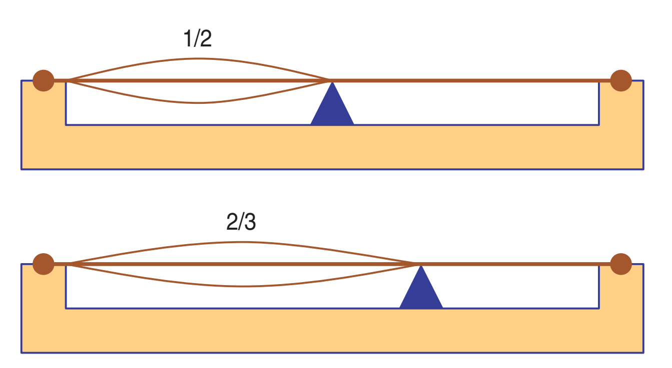
Conocidas las múltiples formas de los “ovillos de hielo”, nos queda imaginar su recorrido. Los copos nacen a gran altitud, donde hace mucho frío; el viento los arrastra durante su crecimiento. Cada vez más pesados, caen lentamente hacia el suelo, atravesando distintas capas de la atmósfera, en las que encuentran condiciones diversas. Así, cada capa y cada sitio de la atmósfera favorecen un cierto mecanismo de crecimiento, luego otro, etc. Una estrella de seis puntas que atraviese una nube a –15 ºC se adornará enseguida con rutilantes agujas; enfrentada a la humedad extrema de una capa baja a –2 ºC, no tardará en enganchar finas placas en los extremos de las agujas.

Pese a los progresos desde Descartes, la nieve guarda todavía muchos misterios. Los copos son casi siempre perfectamente simétricos. No importa su complejidad: los brazos serán idénticos. ¿Por qué? ¿Hay un mecanismo que regule el crecimiento del conjunto del cristal? O bien, para explicar tan asombrosa semejanza, ¿basta con que cada brazo crezca en las mismas condiciones? Los ovillos de nieve siguen intrigándonos.

Juan M.R. Parrondo

La teoría matemática de la consonancia

Las matemáticas y la música han estado unidas al menos desde la civilización griega. Los pitagóricos se dieron cuenta de que dos notas tocadas simultáneamente eran agradables si entre ellas existía una relación matemática simple. Al pulsar una cuerda tensada suena una nota, que depende de la tensión, la longitud y la densidad de la cuerda. Si disminuimos la longitud de la cuerda a la mitad, sin variar su tensión, por ejemplo, colocando una cuña como en la figura 1, sonará una nota más alta que la primera, pero la combinación de ambas será agradable al oído. Es más, la segunda nota suena en realidad muy parecida a la primera. El intervalo entre estas dos notas se denomina *octava* y su sonido es tan parecido, que en música las dos notas se denominan con el mismo nombre. Si la primera es Do, por ejemplo, la segunda nota será otro Do, aunque en una octava superior.



1. Los primeros intervalos pitagóricos. Al dividir la longitud de una cuerda por la mitad se pasa de una nota Do, por ejemplo, al Do de la octava superior. Al disminuir la cuerda hasta 2/3 de su longitud original se pasa del Do al Sol.

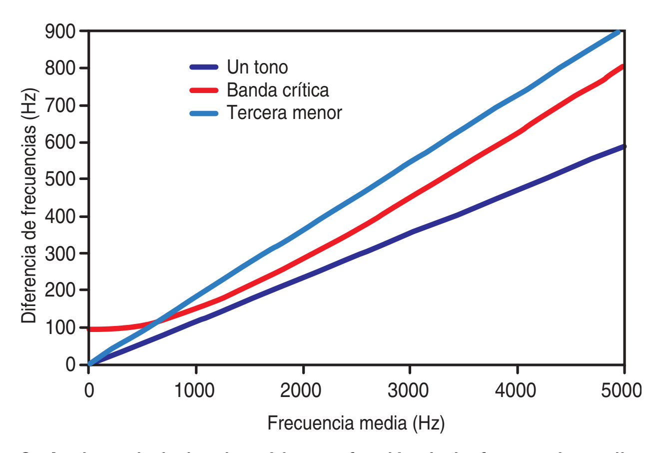
Pero no sólo el intervalo de octava es agradable musicalmente. Los griegos descubrieron que, si la cuerda se acorta hasta 2/3 de su longitud original, la nueva nota también se combina agradablemente con la nota correspondiente a la cuerda completa (*véase la figura 1*). Suponiendo de nuevo que la nota original es Do, la nota de la cuerda 2/3 más corta sería Sol. Hay algunos otros intervalos agradables, que técnicamente se llaman *consonantes*, mientras que otros, la mayoría, son desagradables o *disonantes*.

No existe una clasificación nítida entre intervalos consonantes y disonantes. Sí se da un grado de consonancia o disonancia, que incluso depende del instrumento en el que se toca el intervalo o de la altura de las notas que lo forman. Por ejemplo, un intervalo Do-Mi es claramente consonante; ahora bien, si estas dos notas se tocan en las escalas más bajas de un piano, el sonido que resulta no es del todo agradable. La consonancia también depende, salvo en casos muy claros, como la octava, de la cultura y la educación musical del oyente.

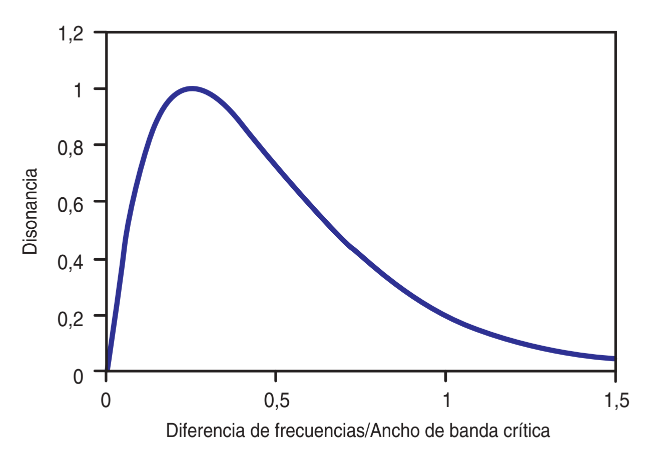
Tanto la consonancia como la disonancia de intervalos constituyen la base de la armonía en la música occidental. Gracias a ellas se construyen las tensiones y las resoluciones que forman el discurso musical. Sin embargo, no hemos tenido una teoría satisfactoria de la consonancia hasta hace poco. Fueron Plomp y Levelt quienes, en 1965, elaboraron la teoría más aceptada, después de revisar ideas de Galileo, Leibniz, Euler y Helmholtz, entre otros.

La nota de un piano, de una flauta o una guitarra, es la suma de varios *tonos puros*. Un tono puro es una onda sinusoidal: una vibración del aire cuya expresión matemática es $A \operatorname{sen}(2\pi\nu t)$, en donde A es la *amplitud* del tono puro y ν su frecuencia, es decir, el número de oscilaciones por segundo. La nota La central del piano está compuesta por un tono puro de frecuencia 440 hertz (440 oscilaciones por segundo) y sus sucesivos múltiplos o armónicos, es decir, tonos de frecuencias $2 \times 440 = 880$ hertz, $3 \times 440 = 1320$ hertz, etc. (véase *Juegos Matemáticos* de enero de 2004). El tono puro de frecuencia más baja, o *fundamental*, determina la altura del sonido que percibimos. Por otra parte, en el caso de una cuerda pulsada, la frecuencia fundamental es inversamente proporcional a la longitud de la misma. De modo que el intervalo de octava lo forman dos notas de frecuencias fundamentales ν y 2ν, y el intervalo de quinta consiste en dos notas de frecuencias ν y $3\nu/2$. De ello se deduce también que el intervalo que forman dos notas no depende de la diferencia de sus frecuencias sino de su cociente, un hecho de especial trascendencia en la teoría matemática de la música.

Las teorías previas de la consonancia se basaban, o bien en la vieja idea pitagórica de que el universo, desde los planetas hasta la armonía musical, se rige por relaciones entre números enteros pequeños, o bien en el hecho de que algunos intervalos consonantes están formados por notas que comparten muchos armónicos. La teoría de Plomp y Levelt mejora y completa esta última idea. En primer lugar, investigaron la consonancia de dos tonos puros de distintas frecuencias, ν_1,ν_2, haciendo que varios oyentes los escucharan y evaluaran en una escala de 1 a 7 el desagrado que les producía. Descubrieron que dos tonos puros cuyas frecuencias estén suficientemente alejadas suenan siempre bien. Más precisamente, existe una *banda crítica* de frecuencias, de modo que, si la diferencia entre las frecuencias de los dos tonos puros excede el ancho de esta banda crítica, entonces los dos tonos son consonantes. El ancho de la banda crítica depende a su vez de la frecuencia media, $\bar{\nu} = (\nu_1 + \nu_2)/2$, de los dos tonos puros presentados, tal y como se aprecia en la figura 2. No disponemos de una expresión matemática para la banda crítica, puesto que se obtiene mediante



2. Anchura de la banda crítica en función de la frecuencia media de dos notas $\bar{\nu} = (\nu_1 + \nu_2)/2$ y comparada con un intervalo de un tono (como el de Do a Re) y uno de tercera menor (como el de La a Do).



3. Disonancia de dos tonos puros en función de la diferencia de sus frecuencias dividida por la anchura de la banda crítica.

experimentación con individuos. Sin embargo, una buena aproximación viene dada por la ecuación:

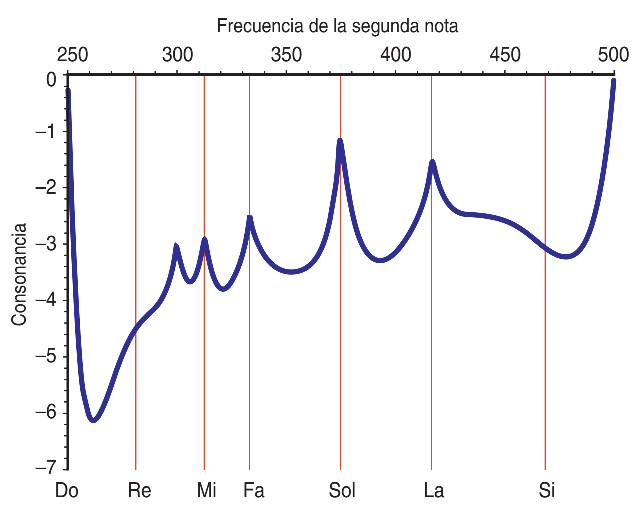
$$\Delta\nu_{crit} = 2\bar{\nu}/11 + 200 \times e^{-\bar{\nu}/1000} - 105$$

Plomp y Levelt también cuantificaron la disonancia dentro de la banda crítica. El resultado se muestra en la figura 3, en donde se observa que la diferencia de frecuencias más disonante es un cuarto de la anchura de la banda crítica. De nuevo la curva es puramente experimental, pero se puede aproximar por la función:

$$d(\nu_1, \nu_2) = 4|x|e^{1-4|x|}$$

en donde $x = (\nu_1 - \nu_2)/\Delta\nu_{crit}$.

Consideremos ahora dos sonidos compuestos por varios armónicos. Tomaremos la fundamental del primer sonido de 250 hertz y variaremos la del segundo entre 250 y 500 hertz, es decir, una octava completa. Supondremos que cada sonido está compuesto por la



4. La curva de consonancia para dos notas. La primera es un Do de 250 Hz y la frecuencia de la segunda varía desde 250 hasta 500 Hz a lo largo del eje horizontal de la gráfica. En rojo se señalan las siete notas de la escala de Do mayor.

fundamental y cinco armónicos, todos ellos de igual amplitud. Para calcular la consonancia o disonancia de estos dos sonidos, basta calcular la disonancia entre los tonos puros que los forman utilizando la fórmula anterior y sumar todas las parejas de tonos puros. El resultado se muestra en la figura 4, en donde también se representan mediante barras rojas verticales las frecuencias de las siete notas de la escala justa de Do mayor. Estas notas se relacionan con el Do inicial mediante los siguientes factores: Do (1), Re (9/8), Mi (5/4), Fa (4/3), Sol (3/2), La (5/3) y Si (15/8). (En realidad, el Do central del piano tiene una frecuencia fundamental de 261,6 Hz, y no de 250 Hz, como se deduce de la gráfica, pero he elegido esta última frecuencia para simplificar la exposición). En lugar de la disonancia entre los dos sonidos, he dibujado la consonancia, que no es más que la disonancia cambiada de signo. Se puede observar cómo aparecen picos en los intervalos consonantes Do-Mi, Do-Fa, Do-Sol, Do-La, y Do-Do (hay también un sexto pico que coincide con el Mi bemol). El lector puede intentar reproducir la curva de consonancia para otros sonidos, formados por otros armónicos con distintas amplitudes. De hecho, incluso se puede encontrar una aplicación Java en Internet que dibuja estas gráficas para diferentes instrumentos, así como explicaciones más detalladas del fenómeno. Especialmente recomendable es el libro *Mathematics and Music*, de Dave Benson, de la Universidad de Georgia, que se puede descargar gratuitamente desde su página web.

De todos modos, la teoría de Plomp y Levelt no explica completamente la consonancia y disonancia de intervalos. John R. Pierce, autor de otro libro delicioso que también habla de la consonancia, *Los Sonidos de la Música* (Biblioteca Scientific American), demostró que la consonancia de ciertos sonidos formados por tonos puros que no son armónicos pero que producen un valor bajo de disonancia, no es tan "musical" como la consonancia de los intervalos consonantes de la escala de Do mayor. La explicación de que el acorde Do-Mi-Sol, por ejemplo, sea tan agradable al oído, se encuentra no sólo en la ausencia de tonos puros disonantes sino también en que las tres notas son armónicos de una misma fundamental: el Do situado dos octavas más abajo.

Evolución

Del evolucionismo

EVOLUTION. THE HISTORY OF AN IDEA, por Peter J. Bowler. University of California Press; Berkeley-Los Angeles-Londres, 2003.

CHARLES DARWIN. THE POWER OF PLACE, por Janet Browne. Princeton University Press; Princeton, 2002. FOSSILS, FINCHES AND FUEGIANS. CHARLES DARWIN'S ADVENTURES AND DISCOVERIES ON THE *BEAGLE*, 1832-1836, por Richard Keynes. HarperCollins Publishers; Londres, 2002. DARWIN AND CO. EINE GESCHICHTE DER BIOLOGIE IN PORTRAITS (I-II). Edición preparada por Ilsen Kahn y Michael Schmitt. Verlag C. H. Beck; Munich, 2001.

DEVELOPMENTAL PLASTICITY AND EVOLUTION, por Mary Jane West-Eberhard. Oxford University Press; Oxford, 2003. THE ORGANIC CODES. AN INTRODUCTION TO SEMANTIC BIOLOGY, por Marcello Barbieri. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

WEGE DER EVOLUTIONSGESCHICHTSSCHREIBUNG, por Martin Langanke. VWB-Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2003.

Polémicas ideológicas aparte, la teoría de la evolución biológica afianza su solidez y dilata su horizonte teórico. Ejemplo de lo primero nos lo ofrece el descubrimiento, hace escasos meses, de un proceso evolutivo en todos los niveles de organización, desde el molecular hasta el poblacional; se trata de la conexión entre selección natural y bioluminiscencia en el escarabajo *Pyrophorus plagiophthalamus*. Ejemplo de lo segundo es el reconocimiento de la influencia, sumada a la génica, de la plasticidad del desarrollo (*Developmental Plasticity and Evolution*) y la aceptación de la importancia de los códigos adquiridos en el decurso de la historia de la vida (*The Organic Codes. An Introduction to Semantic Biology*). Ha habido quien ha parangonado la obra de Mary Jane West-Eberhard y la de Marcello Barbieri con los clásicos de la biología.

Sobre la historia del concepto de evolución debemos a la pluma de Peter J. Bowler varios libros que, deshaciendo mitos como el de la imposición inicial científica del darwinismo frente a una supuesta reacción dogmática o el de la asociación inmediata entre darwinismo y evolucionismo, se han convertido en textos de obligada referencia. *Evolution. The History of an Idea* llega ahora a la tercera edición, renovada y ampliada. Aunque generoso con los antecedentes, el autor se muestra reacio a cualquier viso de anacronismo y delimita, en su contexto, la función real de los precursores. Notoria fue, en efecto, la aportación en 1794 de James Hutton, introductor del concepto de selección natural, y la de William Paley en 1803, en cuya *Natural Theology* se expone, con una nitidez que Darwin no superaría, la relación entre variabilidad y selección; para rechazarla, sin embargo. Medio siglo después, Darwin la convertía en el motor de la evolución: "Esta conservación de las diferencias favorables de los individuos y la destrucción de las que son perjudiciales es lo que yo he llamado selección natural" (*Sobre el origen de las especies mediante la selección natural*).

Por su formación eclesiástica, Darwin conocía a Paley. Pero fue el viaje en el H.M.S. *Beagle* (*Fossils, Finches and Fuegians. Charles Darwin's Adventures and Discoveries on the Beagle, 1832-1836*) lo que le permitió pergeñar su propia tesis de la transformación de las especies a través de su adaptación a un medio cambiante. Había nacido en 1809 en Shrewsbury, donde su padre ejercía la medicina, carrera que quería para su hijo cuando le envió, en 1826, a la Universidad de Edimburgo. Pero al vástago le atraía más la historia natural, que aprendió de Robert Grant (su mentor en lamarckismo) y, sobre todo, de Robert Jameson. Tras el fracaso en Edimburgo se trasladó a Cambridge en 1828, dispuesto a abrirse un camino en la Iglesia de Inglaterra. Tres años después, por mediación de otro naturalista, John Stevens Henslow, emprendía una de las expediciones más famosas de la historia de la ciencia.

"El viaje en el *Beagle* fue, con mucho, el acontecimiento más importante de mi vida, que determinó toda mi carrera", anotó en su autobiografía. Bordeó las costas de América del Sur, visitó Brasil, Tahití y las islas Galápagos, Nueva Zelanda, Australia; se adentró en Chile, Patagonia y Tierra del Fuego. Describió cientos de animales y plantas hasta entonces sin clasificar, recu-



1. Pinzón de Darwin (*Geospiza magnirostris*), por John Gould.

peró huesos fósiles en Argentina, observó la emergencia de nuevas especies en el confinamiento de las islas Galápagos y conoció la fuerza terrorífica del tsunami. Los apuntes tomados aparecieron en su *Journal of Researches into the Geology and Natural History of the Various Countries Visited by H. M. S. Beagle* (1839). Su idea revolucionaria sobre la transformación maduró más lentamente.

Durante la travesía leía los *Principles of Geology* (1831-1833). Allí, Charles Lyell razonaba, contra los postulados catastrofistas, que la superficie terrestre se hallaba en cambio continuo y gradual, de cuya idea se valió Darwin para interpretar el origen de las cadenas montañosas y los arrecifes de coral. La aplicó también a otras cuestiones de historia natural. Una de éstas, surgida en la contemplación de la variedad de adaptaciones de las aves de las Galápagos (pinzones con pico corto y fuerte en las islas ricas en gramíneas y de pinzones con pico largo en las islas ricas en gusanos de tierra). Si el concepto de proceso gradual se lo inspiró Lyell, del *Essay on the Principle of Population* de Thomas Malthus tomaría la imagen de la lucha por la supervivencia y la noción de tasa reproductora para hilvanar su teoría. Con todo, no podemos perder de vista que, con el principio de continuidad, Lyell negaba la posibilidad de evolución progresiva. Por contra, los catastrofistas respaldaban, con su modelo de discontinuidad, la noción de progreso en la historia primigenia de la Tierra.

Durante el decenio de los cuarenta y cincuenta, fue Darwin perfilando su pensamiento con nuevas observaciones de campo, experimentos de cruzamiento y reflexión. El estudio de los percebes, vivos y fósiles, le familiarizó con la anatomía y clasificación. Pero mantuvo en secreto sus lucubraciones sobre la evolución, salvo para un reducido grupo de amigos. En 1856 Lyell le urgió su publicación. En esa tarea andaba cuando recibió un breve ensayo en el que su autor, Alfred Russel Wallace, llegaba a tesis muy similar a la por él construida sobre el origen de nuevas especies (*Charles Darwin. The Power of Place*). Se le apremió para que presentara conjuntamente su trabajo en la Sociedad Linneana de Londres en julio de 1858; en noviembre del año siguiente se imprimía *On the Origin of Species*, cuya idea eje se resume en un aforismo hoy escolar: toda especie, vegetal o animal, evidencia cierto rango de variabilidad; los individuos mejor adaptados a las condiciones del medio sobrevivirán y se reproducirán. Tales son los raíles por los que ha discurrido la vida desde su comienzo. El libro fue vigorosamente defendido por T. H. Huxley (*Darwin and Co. Eine Geschichte der Biologie in Portraits (I-II*). El autor expandió y confirmó sus ideas en *Descent of Man* (1871) y en *Expressions of Emotions* (1872). Murió en abril de 1882, en Down House, donde había vivido y trabajado a lo largo de cuarenta años. Fue enterrado en la abadía de Westminster.



2. Pinzón de cactus (*Cactornis scandens*), por John Gould.



3. Sinsonte de las Galápagos (*Mimus parvulus*), por John Gould.

La aceptación del evolucionismo fue un proceso harto complejo. Muchos darwinistas —incluidos el propio Huxley y otros biografiados extensamente en los documentados volúmenes dirigidos por Ilsen Kahn y Michael Schmitt— no aceptaban lo que se considera hoy su mayor acierto, la presión de la selección natural. En realidad, buena parte del evolucionismo de finales del siglo XIX, asociado a la idea muy arraigada de progreso desde un antepasado común, no era darwinista. No se olvide, además, que el mismo Darwin ajustó su propia explicación del cambio evolutivo con la introducción de varios mecanismos más. En la sexta edición del *Origin* (1872, la más leída) los mecanismos incluían, con la selección natural, el uso y falta de uso de los órganos (tesis de Lamarck), la selección sexual y otros. Mecanismos adicionales que a Wallace y a George Romanes les sobraban, cuando no eran falsos, como demostró August Weismann a través de su elegante refutación experimental del lamarckismo. El darwinismo entero parecía cuestionarse al doblar la centuria, cuando la genética, Hugo de Vries y William Bateson mediante, señalaban que la evolución procedía a través de mutaciones discontinuas.

En el transcurso del primer tercio de siglo la biología procede sin un modelo común sobre los mecanismos de la evolución. Pero la ciencia inicia un nuevo rumbo a raíz de la aparición, en 1930, de *The Genetical Theory of Natural Selection*. Su autor, R. A. Fisher, combina la doctrina darwinista con un nuevo enfoque cuantitativo del estudio de la variabilidad en las poblaciones naturales. La idea terminó por concitar, en la llamada nueva síntesis darwinista, las aportaciones dispersas de genéticos experimentales, sistemáticos y paleontólogos sobre el cambio evolutivo: la selección natural implicaba una competencia entre organismos que favorecía a los



4. Pobladores de la bahía de San Gregorio, en la Patagonia, por Conrad Martens.

más adaptados a un entorno local y en el genoma se hallaba la razón última de toda especiación de las poblaciones. Aunque sigue vigente en sus líneas generales, este modelo neodarwinista ha sufrido importantes envites en los últimos decenios que han puesto de manifiesto su fragilidad.

Hemos asistido a una profundización en determinados conceptos. Tal, el de la selección sexual o el de selección de parentesco, donde el énfasis se pone, más que en la supervivencia, en el éxito de la transferencia de los genes a la generación siguiente. Suele repetirse el ejemplo del pavo real; el inconveniente que le supone, ante los depredadores, la magnificiencia de su cola queda compensado con la ventaja de atraer a las pavas. Esa colisión aparente entre dos presiones de selección admite explicación en otras ocasiones a través de la teoría de juegos, desarrollada por John Maynard Smith en su modelo de halcones y palomas. En tales casos, la selección no se limitará a promover los instintos de agresión, que defendería un darwinista a ultranza, sino que operará para mantener un equilibrio entre los diferentes talantes de la población. Ligados con todo ello se encuentran los debates actuales sobre la hipótesis del altruismo y la sociobiología.

Pero la nueva síntesis se ha visto expuesta incluso a crisis más graves. Frente a su tesis nuclear que convierte la evolución en un proceso continuo de cambio, el modelo del equilibrio puntuado coloca sobre el tapete las innumerables muestras de una evolución episódica, discontinua. El registro geológico nos indica que hay especies que permanecen estacionarias (en estasis) a lo largo de millones de años, para ser sustituidas, en un intervalo breve, por especies emparentadas. No existe razón suficiente para considerar los hiatos del registro fósil meros artefactos de la excavación. Admitiendo el principio fundador, las poblaciones desprendidas del grueso de la especie que vivirían en un entorno insólito, evolucionarían en un segmento temporal muy corto y no quedaría prueba paleontológica debido a la rapidez del cambio y a la zona restringida donde aconteció ese fenómeno. Si la nueva especie gozó de la posibilidad de invadir el territorio principal de la especie parental, terminaría, muy pronto, por remplazarla, bajo circunstancias en que los cambios ambientales les confirieron ventaja.

La brusquedad del cambio operado sugiere la intervención de factores internos que preservaban la forma originaria, quizá restricciones impuestas por el desarrollo corporal. Muchos rasgos que tomamos

BIOTECNOLOGIA

INVISIBLE FRONTIERS, THE RACE TO SYNTHESIZE A HUMAN GENE, por Stephen Hall. Oxford University Press; Oxford, 2002.

Publicado por primera vez en 1987, el interés del contenido y la viveza de la exposición ha aconsejado esta nueva edición. Se lee como una atractiva novela. El prefacio incorporado de James D. Watson realza su valor.

El buen estilo literario, junto con la descripción no sólo profesional sino incluso física de los principales actores del desarrollo de la biotecnología molecular, nos presentan una historia viva de la saga que condujo a la síntesis y a la clonación de los genes que codifican la insulina y la hormona del crecimiento humano. No sólo se presentan las vivencias de los protagonistas, que se sirvieron de técnicas de la clonación, principalmente los grupos de San Francisco y de Harvard, y posteriormente Genetech, la primera compañía que utilizó la ingeniería genética para la obtención de fármacos. También se hace referencia a las rivalidades existentes entre estos laboratorios y dentro de éstos entre los actores directos del trabajo.

En relación con el desarrollo de la biotecnología, se abordan las reservas con que la sociedad recibió el desarrollo de esta técnica por los temores que despertó la posibilidad de que se presentaran dificultades en el control de las bacterias portadoras de ADN recombinante y que constituyeran un peligro para la población. (Con el tiempo fueron aceptadas por la legislación norteamericana.) Se resalta que, contrariamente a lo supuesto por estos temores, la comercialización de los productos de la biotecnología, puso a disposición de la medicina fármacos de gran utilidad terapéutica, tales como la insulina y la hormona del crecimiento humanas, en vez de los de origen animal que se habían venido empleando hasta entonces.

—ANTONIO PREVOSTI PELEGRÍN

como caracteres y suponemos que se fundan en una base genética son, en realidad, subproductos del proceso de desarrollo, necesarios para la construcción armónica del organismo y no accesibles a la acción de la selección. Muchas estructuras de los seres vivos que se reputan adaptativas podrían ser consecuencias necesarias de la forma en que opera el proceso de desarrollo; en cuyo caso ninguna cantidad de presión selectiva podría cambiar su estructura básica.

Tales estructuras básicas tejerían, pues, los patrones subyacentes que pueden ser modificados, aunque nunca fundamentalmente alterados, lo que explicaría por qué no han aparecido nuevos tipos desde el Cámbrico. Quizá las restricciones del desarrollo podrían predisponer para que la variación se encauzara en determinadas direcciones, no obligadamente adaptativas. Idea que nos lleva de la mano a la hipótesis epigenética o la biología evolutiva del desarrollo, abreviada "evodevo" (*Developmental Plasticity and Evolution*). Elaborada en los últimos decenios del siglo XX, dicha hipótesis propone que, para entender la evolución, hemos de integrar las restricciones del desarrollo. Restricciones que constituyen una limitación importante en la capacidad que tiene la selección natural de manipular el organismo mediante el mero moldeo de su genotipo.

Se fecha el punto de arranque de esta nueva corriente integradora de evolución y desarrollo, con el fenotipo convertido en objeto de selección, en una conferencia celebrada en Dahlem en 1981. Tres años más tarde, W. Arthur difundía un primer esbozo sistemático (*Mechanisms of Morphological Evolution*), desarrollado en 1988 (*Theory of Evolution of Development*). En 1992, B. K. Hall facilitaba su intelección en un manual, *Evolutionary Developmental Biology*. Desde entonces, es un río que no cesa. El planteamiento se desgrana con un rigor aplastante. Sabemos que la evolución acontece en tres niveles: cambios en la frecuencia génica, introducción de nuevos caracteres y aparición, adaptación y radiación de nuevas especies. Los tres comparten un denominador común: el cambio genético a través del tiempo. El cambio en la frecuencia génica opera en la población mediante la mutación, la selección, la deriva, la migración y el cambio meiótico. La introducción de nuevos caracteres y la aparición de la radiación adaptativa de las especies requiere alteración de la ontogenia, aun cuando la adaptación se refleje en el comportamiento o en la fisiología. Ahora bien, los cambios que consideramos distintivos de los descendientes con modificación —origen de nuevos fenotipos, gigantismo, enanismo, neotenia, pedomorfosis, mímesis, plasticidad fenotípica e incluso especiación— han surgido, todos, de una remodelación más o menos sustantiva de los procesos de desarrollo.



5. *Caryophyllia* de la isla Isabel, por Conrad Martens.

La inducción ambiental constituye, pues, un iniciador importante del cambio evolutivo adaptativo. El origen y la evolución de una novedad adaptativa no espera una mutación; los genes siguen, no preceden, en la evolución. Además, las novedades evolutivas resultan de la reorganización de fenotipos preexistentes y la incorporación de elementos del entorno. Los trazos nuevos no son construcciones *de novo* que dependan de una serie de mutaciones genéticas. En definitiva, la evolución designa un cambio fenotípico que implica, por supuesto, la frecuencia génica, pero no exclusivamente.

En cierta medida asociado al programa epigenético merece citarse el modelo de los códigos (*The Organic Codes*), en el que el crítico ve numerosos puntos de convergencia con la teoría de la información, tan fecunda en ecología y en otras ramas de la biología. Entre el código genético y el código cultural, mediaron casi cuatro mil millones de años. Barbieri aumenta el número de códigos e identifica su aparición con los momentos cruciales de la historia de la vida. Evoluciona ésta a través de convenciones naturales (reglas codificadoras) y de la selección natural.

Desde mediados de los años noventa del siglo pasado, la ciencia ha venido admitiendo un número paulatinamente creciente de códigos. En 1996, Redies y Takeichi propusieron un código adhesivo para dar cuenta del comportamiento de las cadherinas en el desarrollo del sistema nervioso. Por entonces, William Calvin escribía *The Cerebral Code*. En 1998, el propio Barbieri mostraba que sólo los códigos orgánicos podían explicar la transducción de señales y los procesos de corte y empalme, y Chris Ottolenghi descubría que determinadas redes moleculares se ajustaban a códigos degenerados. En 1999, Nadir Maraldi extendía la idea de códigos de transducción de señales a la señalización nuclear; Richard Gordon introdujo la idea de un código de diferenciación. Por último, en el año 2000 se identificaron un código glucídico y un código de histona.

Resulta llamativo que la aparición de un conjunto completo de reglas coincida con la adquisición repentina de nuevas propiedades fundamentales, lo que sugiere un nexo entre códigos y discontinuidades paleontológicas. Los códigos se presentan, en esta perspectiva, como mecanismos que encierran la capacidad de crear innovaciones biológicas, como motores de la evolución. En efecto, el código genético coincide con la aparición de la vida; los códigos de corte y empalme, con la aparición de las células eucariotas; los códigos de adhesión, con la aparición de la pluricelularidad; los



6. Fueguinos y el *Beagle*, por Conrad Martens.

códigos de patrones, con la configuración de grandes taxones (vertebrados, amniotas, mamíferos); los códigos lingüísticos, con la evolución cultural. Adviértase que la incorporación de un nuevo código orgánico no extingue el anterior. Los eucariotas no eliminaron a los procariotas, ni los metazoos acabaron con los eucariotas unicelulares. Cada código orgánico representa una forma estable de vida. Una vez surgido, nunca ha desaparecido. Mientras que las estructuras morfológicas emergieron y desaparecieron en incontables ocasiones, los códigos orgánicos "profundos" nunca se anularon. Han supuesto, en cada caso, un incremento de complejidad del sistema. Al presentarse de manera instantánea refuerzan la tesis de la discontinuidad paleontológica.

Ni la epigenética ni el modelo de los códigos excluían el darwinismo. Muy distinta es la objeción a su fundamento teórico que le planteó sobre todo Karl Popper desde la filosofía y Willi Hennig desde la biología (*Darwin and Co.* y *Wege der Evolutionsgeschichtsschreibung*). La selección natural, aducen los críticos, constituye una tautología, un juego de palabras, no una proposición genuina con consecuencias empíricas. Si definimos, exponen, la selección natural como supervivencia del más adaptado ("fittest") y si preguntamos por qué es el más adaptado y se nos responde que porque sobrevive, la tautología no admite dudas. Desde el flanco evolucionista se replica que esa eficacia biológica ("fitness") debe definirse por el nivel de adaptación ("how well is adapted") del organismo a su entorno; en razón de hallarse mejor adaptado, el organismo cuenta con mejores condiciones para sobrevivir y reproducirse. En la polilla moteada, la coloración oscura le aporta protección frente a los depredadores cuando el entorno está ligeramente ennegrecido; las investigaciones han demostrado que las aves atacan a las polillas de color y dejan de lado las negras.

Los filósofos continúan objetando que la explicación evolutiva de los acontecimientos del pasado carece de carácter científico porque no pueden someterse a contrastación empírica. A ello los evolucionistas responden que aplicar la metodología de la física a cualquier ciencia histórica es ignorar que un estudio empírico de estas cuestiones debe adoptar diferentes criterios. Popper argumentaba que, puesto que los escenarios adaptativos constituían secuencias de episodios singulares, el evolucionismo no ofrecía leyes generales y, por tanto, no podía establecer predicciones sobre el futuro. Si no hay predicciones, tampoco puede haber una comprobación experimental eficaz. En respuesta a Popper, desde el lado evolucionista se le recriminaba que no distinguiera entre la teoría causal del darwinismo y su aplicación a sucesos particulares de la historia de la vida. Réplicas y contrarréplicas de los seguidores de Popper continúan. Con todo, la mayoría de los darwinistas admitirían que su teoría carecería de consistencia suficiente si no pudiera abordar cuestiones tales como de qué modo se han producido las diversas etapas de la evolución.

Desde la entraña de la sistemática biológica se ha puesto en cuestión también el carácter científico del darwinismo. Nos referimos al cladismo, doctrina propuesta por Hennig, quien resaltaba que la clasificación de las especies en función de su origen debía centrarse exclusivamente en los puntos nodales de divergencia del tronco de la vida. El progenitor de esa doc-

MISIONES ESPACIALES

APOLLO: THE LOST AND FORGOTTEN MISSIONS, por David J. Shayler. Springer-Praxis, 2002.

David J. Shayler será sin duda recordado como uno de los primeros especialistas en la historia temprana de la era espacial y desde luego sus trabajos se contarán entre las primeras referencias obligadas para quienes en el futuro se acerquen al tema. Se destaca la selección y la ordenación de la información empleada que comprende más de treinta años de hechos que acontecieron mientras el autor los registraba. Estamos ante un libro de más de trescientas páginas de exposición precisamente detallada y respaldada por una información que el autor ha debido recoger en buena parte en fuentes primarias.

El argumento central de *APOLLO* lo constituyen los planes que se formularon para aprovechar la potencialidad de los equipos e instalaciones del programa Apolo más allá de los desembarcos en la Luna, complementando los logros de éstos mediante vuelos de investigación en órbita terrestre con el propósito de preparar las primeras expediciones tripuladas hasta Marte. Fueron muchas las esperanzas que se depositaron en las posibilidades de los medios puestos a disposición del programa Apolo, y de esas esperanzas algunas se materializaron posteriormente, pero muchas otras no. El hilo expositivo se desarrolla paralelo al programa Apolo en sí, recordando y narrando los hechos y circunstancias relacionados con las misiones Apolo programadas pero que no llegaron a materializarse por una u otra causa, como la Apolo 13 que fue abortada al final. Se ofrece al lector una visión de lo que cada una de tales misiones habría logrado de haberse llevado a cabo.

Una observación. La presentación del libro corre a cargo de Don L. Lind, astronauta. Tratando de justificar los retrasos que muchos consideran excesivos en el camino hacia el espacio, traza un paralelismo entre la situación presente de la era espacial y la presencia occidental en el Pacífico en los siglos pasados. Sobre las apreciaciones que aparecen en el último párrafo de la página xiii, no sé si algún historiador no objetaría.

—JOSÉ VILARDELL

trina, Emil Hans Willi Hennig, nació en 1913 en Dürrhennersdorf. A los 18 años realizó su primer trabajo teórico, *Die Stellung der Systematik in der Zoologie* ("El puesto de la sistemática en zoología"), que le abrió la puerta del museo de historia natural de Dresde. Desde 1932 hasta 1937 estudió zoología, botánica y geología en la Universidad de Leipzig. A los 22 años preparó su tesis doctoral, bajo la dirección de Paul Buchner, sobre el aparato reproductor de los dípteros ciclorráfidos. Otros trabajos contemporáneos suyos fue *Revision der Tyliden (Dipt. Acalyp.)* y *Revision der Gatung Draco (Agamidae)*. Tras su promoción, Hennig ingresó en el museo de Dresde, subvencionado por el Instituto Alemán de Entomología. Durante la guerra sirvió en los frentes de Polonia, Francia, Dinamarca y Rusia. Tras una herida de granada en mayo de 1942, se le destinó a la Academia militar de medicina tropical de Berlín. Después de la capitulación inició su carrera docente universitaria, primero en Leipzig, luego en Potsdam y otras. Murió en 1976.

Los innumerables trabajos dedicados a los géneros de insectos, actuales o fósiles, que contaron con una espléndida historia sobre las inclusiones en ámbar (*Sommergeschichte der Insekten*), no limitaron, empero, su imponente obra científica. Agregaba a la sistemática la morfología comparada y las cuestiones filogenéticas y de distribución geográfica. Se interesó por los reptiles. Pero su creación fundamental fue la sistemática filogenética, esculpida en *Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik* (1950). Se propone establecer los criterios y fundamentos de los troncos y de las derivaciones en que deben acomodarse las especies, reconstruir la filogenia.

Niegan los cladistas que la relación de antepasado a descendiente pueda inferirse de una forma científicamente rigurosa. Por definición, todos los descendientes de la especie fundadora formaban parte del mismo clado y, por ende, pertenecían al mismo taxón, sin importar cuánto hubieran ellos cambiado subsiguientemente. Si aves y mamíferos habían descendido ambos de los reptiles, pertenecían al mismo clado y no debían categorizarse como clases separadas. Pero si se insistía en categorizarlos como clases, los reptiles debían abandonar ese taxón, porque constituyen sólo el residuo de un clado después de que dos de sus principales divisiones se hubieran alejado. Para los cladistas, la vieja clase Reptilia constituía una abstracción carente de sentido. Los seguidores más radicales de este sistema sostenían que, en un cladograma, todas las especies, vivas o fósiles, tenían que disponerse en una misma línea al final del árbol: las ramificaciones representaban sólo grado de parentesco y no tenía ningún significado histórico. Un cladograma construido de acuerdo con esa premisa no se correspondía con un árbol evolutivo, si bien podía ser coherente con diversos árboles posibles porque no podía representar el parentesco de ancestro-descendiente.

En este contexto, la evolución resultaba irrelevante para describir el parentesco. Todo lo más que podía reconocerse eran grupos de especies hermanas descendientes de un ancestro común, completamente hipotético en principio. Desde esta perspectiva, la evolución se torna carente de sentido, porque aun cuando uno pueda creer que ha sucedido no puede apelar a ella para generar hipótesis científicamente contrastables. Ni que decir tiene que no han faltado réplicas contra esos postulados. Entre ellas, la de David Hull.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Verificación de circuitos

Acabamos de recibir una gran colección de circuitos digitales de un fabricante no demasiado de fiar. Nos informa de qué conexiones hay, y entre qué elementos de los circuitos. Nos dice, además, qué función deben desempeñar tales elementos. Hemos de averiguar si los elementos son los que se supone que son. Deseamos que el número de comprobaciones necesario para saber si el fabricante ha instalado realmente los elementos correctos resulte lo menor posible. Estos circuitos utilizan sólo elementos de dos tipos, puertas lógicas O y puertas lógicas Y. Cada una de ellas queda caracterizada por una tabla de verdad, que pone en correspondencia los estados de sus entradas con el estado de la salida (*véanse las tablas al pie*). La salida de una puerta Y solamente es 1 cuando las dos entradas son 1, mientras que la salida de una puerta O es 1 cuando al menos una de sus entradas es 1.

Como ejercicio preliminar, supongamos que el circuito se encuentra en la configuración de tres elementos que vemos abajo a la izquierda. Se sospecha que la puerta O (elemento 3) puede ser en realidad una puerta Y, y que una o ambas puertas Y (elementos 1 y 2) pueden ser en realidad puertas O. Cabe probar el circuito introduciendo un valor binario (bien un 1, bien un 0) en cada una de las entradas (A, B, C y D) y observando qué valores se obtienen en las salidas (E y F). Basta una comprobación para determinar si las puertas lógicas de este circuito están correctamente rotuladas. Ahora bien, ¿qué entradas se han de utilizar para la prueba, y qué valores deben esperarse?

Esta es la solución: Se pone un 1 en la entrada A, 0 en la B, 1 en la C y 1 en la D. Si el elemento 2 es verdaderamente una puerta Y, su salida será 0. Si el elemento 1 es verdaderamente un elemento Y, la salida E será 0, y si el elemento 3 es verdaderamente una puerta O, la salida F será 1. Si alguno de los elementos está rotulado erróneamente, las salidas E y F no serán 0 y 1, respectivamente.

Fijémonos ahora en el circuito de cuatro elementos que vemos abajo a la derecha. ¿Cuál es el número mínimo de ensayos necesarios para verificar el circuito, y qué entradas habrán de aplicarse en cada caso? Como segundo problema, responda a la misma cuestión para un circuito con idéntica configuración, pero que contenga cuatro puertas Y. Por último, volvamos a la primera ilustración y consideremos todas las posibles combinaciones de puertas Y y O que se pudieran disponer con esta configuración de tres elementos. ¿Qué combinaciones pueden ser comprobadas utilizando sólo un ensayo?

Tabla de verdad de la puerta Y

Entrada	Entrada	Salida
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabla de verdad de la puerta O

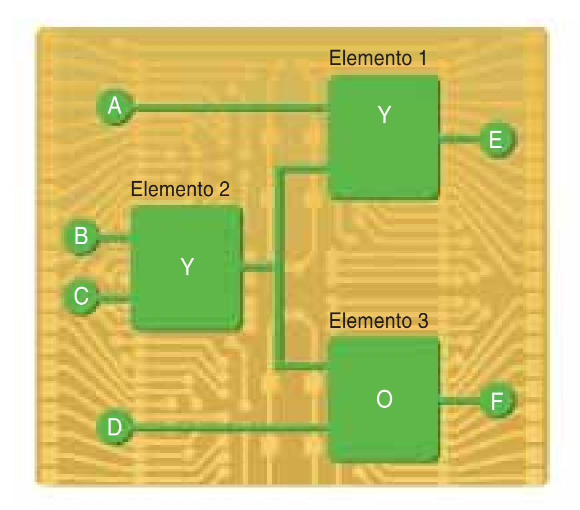
Entrada	Entrada	Salida
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

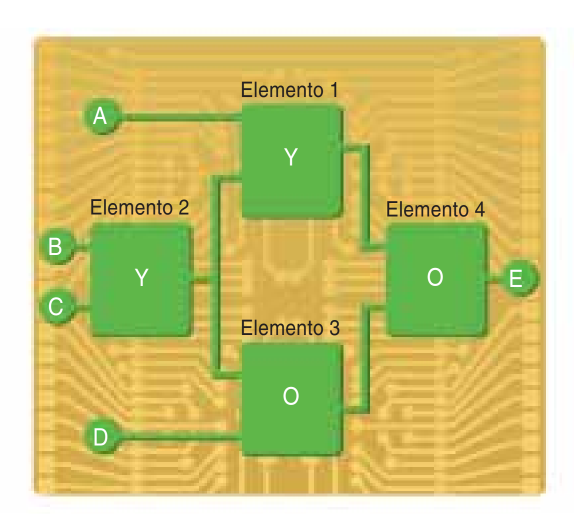
Solución del problema del mes pasado:

La máxima secuencia sorprendente de orden 2 compuesta a partir de las cinco primeras letras del alfabeto tiene una longitud de 12 letras. Un ejemplo es AABCDECBDBAE. Una secuencia sorprendente de orden 2 bastante larga, que usa las 10 primeras letras, es BDGCJHHFACAEJGFIEDIBHCGBFJ. Si se utilizan las 26 letras del alfabeto inglés se tiene una larga secuencia sorprendente de orden 2: HLYOBAZQCRLDSGMVKDWXTEEPXIKNUJBURFTGWIPVJIMSMKCVYHDOORNGZLEXAWHZBY. Una secuencia larga y sorprendente de orden 3 construida con cinco letras es BCEDACDADAECCBBDEA.

Solución en la Red

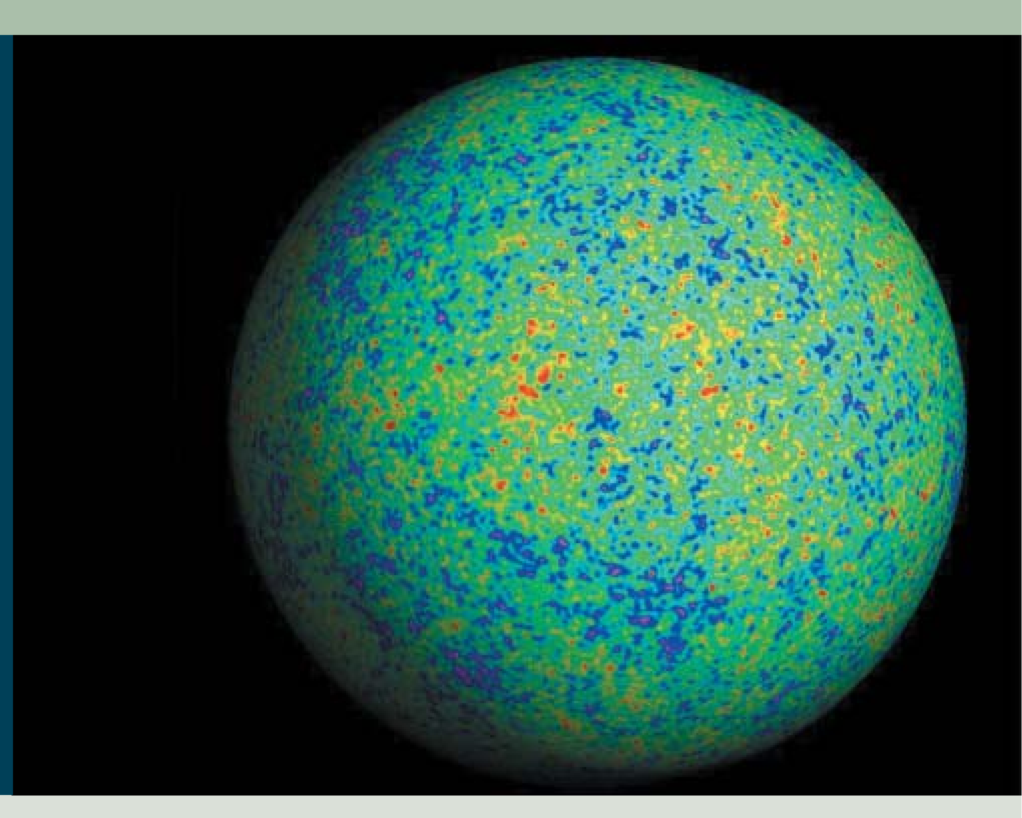
Pueden verse un análisis más completo del problema del mes pasado y una solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.





MEGHAN GERETY





SINFONIA COSMICA,
por Wayne Hu
y Martin White

Las recientes observaciones sobre la radiación del fondo de microondas nos describen un universo de resonancias armónicas.

SALIR DE LA OSCURIDAD,
por Georgi Dvali

Quizá la aceleración cósmica no la cause la energía oscura, sino un inexorable flujo de gravedad que se escapa de nuestro mundo.



MAQUINAS E INSTRUMENTOS CIENTIFICOS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS DE BARCELONA,
por Carles Puig Pla

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, la Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona recurrió a los artesanos para fabricar las máquinas e instrumentos de la nueva física.



PANTALLAS DE PELICULA ORGANICA,
por Webster E. Howard

Las pantallas de materiales orgánicos fotoemisores brillan más que las de diodos emisores de luz. También logran un rendimiento mayor. Podrán incluso desplegarse sobre una mesa de despacho.



TERREMOTOS DE LA ANTIGUEDAD,
por Michael Schnellmann, Flavio S. Anselmetti, Domenico Giardini, Judith A. McKenzie y Steven N. Ward

La inspección geológica del subsuelo del lago de Lucarno saca a la superficie una secuencia de temblores prehistóricos.

